

# Morfologische ontwikkelingen in het Schelde estuarium bij voortzetting van het huidige beleid en effecten van een verdere verdieping van de vaargeul en uitpolderingen langs de

**Deelovereenkomst 2 en 3 Morfologie**

**Jeuken, M.C.J.L., Z.B. Wang, T. van der Kaaij, M. van Helvert, M. van Ormondt, R. Bruinsma, I. Tanczos**



---

## Kwaliteitscontrole

<p>Gezien door m.e.r.-coördinatoren (M.G.S.M. van Dyck en P.A. Weijers):</p> <p>Handtekening:          Datum:</p> <p>Handtekening:          Datum:</p>	<p>Gezien door projectdirecteur (H.B. van Essen):</p> <p>Handtekening          Datum:</p>
--	---

## Colofon

Opdrachtgever	ProSes
Opdrachtnemer	Consortium Arcadis - Technum
Titel	Morfologische ontwikkelingen in het Schelde estuarium bij voortzetting van het huidige beleid en effecten van een verdere verdieping van de vaargeul en uitpolderingen langs de Westerschelde
Contactpersoon	Claire Jeuken
Bestand	L:\110651.000021 SMER\Archief\Deelprojecten\2. Morfologie\8. Producten\3-0.8.6 Hoofdrapport
Versie	
Status	Definitief
Datum	11 juni 2004
Archief	3-0.8.6

---

# Inhoudsopgave

---

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Achtergrond	6
1.2	De instandhouding van de fysieke systeemkenmerken	7
1.3	Doelstelling en algemene aanpak van het morfologisch onderzoek	9
<b>2</b>	<b>Indicatoren</b>	<b>11</b>
2.1	Inleiding	11
2.2	Morfologische indicatoren	11
2.3	Hydrodynamische indicatoren	20
2.4	Geografische definities	20
<b>3</b>	<b>Onderzoeksmiddelen</b>	<b>22</b>
3.1	Inleiding	22
3.2	ESTMORF-model	22
3.3	Het SOBEK model	27
3.4	Het 1-element model	29
3.5	Het morfologisch DELFT3D model	31
3.6	Onzekerheden	32
3.7	Samenvatting	34
<b>4</b>	<b>De huidige morfologische situatie in een historisch perspectief</b>	<b>38</b>
4.1	Inleiding	38
4.2	Het ontstaan van het estuarium en het meergeulensysteem	38
4.3	Morfologische fenomenen en hun samenhang	43
4.4	De zandhuishouding	47
4.5	De stabiliteit van de geulen in de macro- en mesocellen	53
4.6	De ontwikkeling van de intergetijdengebieden	56
4.7	De ontwikkeling van de ondiepwatergebieden	59
4.8	Discussie en conclusies	60
<b>5</b>	<b>Morfologische ontwikkelingen in het nulalternatief</b>	<b>64</b>
5.1	Inleiding	64
5.2	Het nulalternatief	64
5.3	Ontwikkelingen in de zandhuishouding	68
5.4	De stabiliteit van de geulen in de macrocellen	81
5.5	De ontwikkeling van de kortsluitgeulen in de mesocellen	94
5.6	De ontwikkeling van het intergetijdengebied	99
5.7	De ontwikkeling van het ondiepwatergebied	103
5.8	Discussie en conclusies	107

<b>6</b>	<b>Morfologische effecten van uitpolderingen langs de Westerschelde</b>	<b>114</b>
6.1	Inleiding	114
6.2	Voorbeeldmaatregelen in het morfologisch onderzoek	114
6.3	Veranderingen in de zandhuishouding	115
6.4	Effecten op de stabiliteit van de geulen.	119
6.5	Effecten op de ontwikkeling van het intergetijdengebied	121
6.6	Effecten op de ontwikkeling van het ondiepwatergebied in de Westerschelde	123
6.7	Discussie en conclusies	124
<b>7</b>	<b>7 Morfologische effecten van een verdieping</b>	<b>126</b>
7.1	Inleiding	126
7.2	De verdiepingsalternatieven	129
7.3	Effecten op de ontwikkelingen in de zandhuishouding	133
7.4	Effecten op de ontwikkeling van de geulen in de Westerschelde	146
7.5	Effecten op de ontwikkeling van het intergetijdengebied in de Westerschelde	155
7.6	Effecten op de ontwikkeling van het ondiepwatergebied	160
7.7	Het mondingsgebied en de Beneden Zeeschelde	164
7.8	Discussie en conclusies	166
<b>8</b>	<b>Morfologische effecten van een verdieping in combinatie met uitpolderingen</b>	<b>172</b>
8.1	Inleiding	172
8.2	Effecten op de zandhuishouding	172
8.3	Effecten op de stabiliteit van de geulen	174
8.4	Effecten op de ontwikkeling van de intergetijdengebieden	178
8.5	Effecten op de ontwikkeling van het ondiepwatergebied	180
8.6	Discussie en conclusies	181
<b>9</b>	<b>Samenvatting en aanbevelingen</b>	<b>183</b>
9.1	Samenvatting	183
9.2	Aanbevelingen	191
<b>10</b>	<b>Referenties</b>	<b>195</b>
	<b>Bijlage A – Het Cellenconcept</b>	<b>199</b>
	<b>Bijlage B - Het actualiseren van ESTMORF met de bodemligging 2001</b>	<b>207</b>
	<b>Bijlage C – de vertaling van 1D ESTMORF resultaten naar een rooster van een 2Dh-model</b>	<b>211</b>
	<b>Bijlage D - Vaargeulonderhoud en zandwinning in het nulalternatief en de verdiepi</b>	<b>verdiepi</b>
		<b>ngsalter</b>
		<b>natieven</b>
		<b>213</b>

---

**Bijlage E - Erosie- en sedimentatiekaarten voor twee verdiepingsalternatieven 219**

**Bijlage F - Resultaten van DELFT3D berekeningen 221**

**Bijlage G - Relatieve erosie en sedimentatie in het mondingsgebied bij verschillende verdiepingsalternatieven 227**

---

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

In 2000 is de langetermijnvisie voor het Schelde-estuarium verschenen. De langetermijnvisie (LTV) geeft voor het Schelde estuarium het volgende globaal omschreven Streefbeeld voor 2030: het estuarium is in 2030 een gezond en multifunctioneel estuarien watersysteem dat op duurzame wijze wordt gebruikt voor menselijke behoeften. Dit Streefbeeld kent vijf kenmerken (RWS en MVG, 2001), waarvan de volgende vier van belang zijn voor de strategische milieueffectenrapportage (S-M.E.R.):

1. De instandhouding van de fysieke systeemkenmerken van het estuarium is uitgangspunt voor het beheer en beleid.
2. Maximale veiligheid is een belangrijke bestaansvoorwaarde voor beide landen (Veiligheid).
3. Als trekpaard voor de welvaart zijn de Scheldehavens optimaal toegankelijk (Toegankelijkheid).
4. Het estuarien ecosysteem is gezond en dynamisch (Natuurlijkheid).

Om het Streefbeeld 2030 te kunnen bereiken dient op middellange en lange termijn een reeks van maatregelen of ingrepen te worden gerealiseerd op het gebied van Toegankelijkheid, Veiligheid en Natuurlijkheid. De instandhouding van deze fysieke systeemkenmerken is een randvoorwaarde waaraan (alternatieve) maatregelen en projecten zondermeer moeten voldoen. Voldoen deze niet, dan worden de projecten en maatregelen verder niet in beschouwing genomen. Voor het nader specificeren van deze maatregelen en projecten worden een strategische milieueffectenrapportage (S-M.E.R.) en een maatschappelijke kosten-batenanalyse uitgevoerd (MKBA). De resultaten van deze studies vormen de basis voor het opstellen van de zogenaamde Ontwikkelingsschets Schelde-estuarium 2010 (OS2010), een beleidsplan voor de middellange termijn, door de opdrachtgever ProSes.

Het doel van de S-M.E.R. bestaat uit bijdragen aan een verantwoorde en strategische keuze uit diverse maatregelen, zodat in de Ontwikkelingsschets Schelde-estuarium 2010 een samenhangend pakket op de thema's Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid kan worden gepresenteerd.

De studie voor het strategische milieueffectenrapport wordt uitgevoerd door een consortium onder leiding van ARCADIS en Technum (CAT). Binnen het project zijn vijf deelonderzoeken gedefinieerd die door verschillende partners van het consortium worden uitgevoerd (Tabel 1-1). WL|delft Hydraulics heeft het morfologisch onderzoek uitgevoerd in de rol van genomineerde onderaannemer.

**Tabel 1-1 Samenstelling van het consortium en bijdragen aan het S-MER**

Partij	Rol
CAT	Consortiumleider en trekker van de S-M.E.R. trekker deelonderzoeken Overige disciplines, Sturing en Intergratie, Bodem Overig.

---

Alkyon	Trekker van het deelonderzoek Water
HWE	Trekker van het deelonderzoek Ecologie
IMDC	partij in het deelonderzoek Water voor wat betreft de Veiligheid
WL delft Hydraulics	trekker van het deelonderzoek Morfologie (Bodem)

## 1.2 De instandhouding van de fysieke systeemkenmerken

In de langetermijnvisie voor het Schelde-estuarium worden de fysieke systeemkenmerken van het estuarium als volgt gespecificeerd (RWS en MVG, 2001): 1) een open en natuurlijk mondingsgebied, 2) een systeem van hoofd- en nevengeulen met tussenliggende en aangrenzende intergetijdengebieden en ondiepwatergebieden in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde, het zogenaamde meergeulensysteem, 3) een riviersysteem met een meanderend karakter in de Zeeschelde, en 4) een grote diversiteit van schorren, slikken en platen in zout, brak en zoet gebied, gecombineerd met natuurvriendelijke oevers.

Het morfologisch onderzoek dat in het kader van de S-M.E.R. wordt uitgevoerd, richt zich op het toetsen van de randvoorwaarden waaronder het meergeulensysteem in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde (tot aan het Deurganckdok) in stand kan worden gehouden. De instandhouding van het meergeulensysteem is nodig om de Toegankelijk, Natuurlijkheid en Veiligheid in het estuarium in de toekomst te kunnen waarborgen. Hierbij zijn minimaal vier morfologische aspecten van belang:

### *I De zandhuishouding van het estuarium*

De morfologische ontwikkelingen van de geulen, de intergetijdengebieden en de ondiepwatergebieden in het meergeulensysteem hangen nauw met elkaar samen (zie ook Hoofdstuk 4). Deze ontwikkelingen van het meergeulensysteem kunnen tot uitdrukking komen in veranderingen van de zandhuishouding van het estuarium. Met de zandhuishouding wordt bedoeld de grootschalige patroon van de langtermijn gemiddelde sedimenttransporten en grootschalige tendensen van erosie en sedimentatie. De lange termijn (decennia-eeuwen) import van sediment (van zee) kan leiden tot een verlanding van het estuarium, terwijl export van sediment (naar zee) kan leiden tot een erosie van het estuarium, waarbij intergetijdengebieden verdrinken.

### *II Het systeem van hoofd- en nevengeulen*

De morfologische ontwikkeling van het systeem van hoofd- en nevengeulen is van belang voor de Toegankelijkheid naast de Natuurlijkheid en Veiligheid van het estuarium. De estuariene dwarsdoorsnede in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde tot aan het Deurganckdok wordt gekenmerkt door (minimaal) twee geulen die van elkaar gescheiden worden platen en/of ondiepwatergebied. Een van deze geulen wordt gebruikt als hoofdvaargeul en wordt daarom aangeduid als hoofdgeul. De andere geul wordt gebruikt als nevenvaarwater door de kleinere scheepvaart en wordt vaak aangeduid als nevengeul. Het behoud deze twee typen geulen is daarmee van praktisch belang voor de scheepvaart. Een systeem met slechts één geul is eveneens niet wenselijk omdat een dergelijk systeem veel kleinere afmetingen zal hebben dan een twee-geulensysteem en daarmee beperkingen oplegt aan de afmetingen en intensiteit van de scheepvaart.

Om de hoofdvaargeul te onderhouden wordt op de ondiepe en smalle plaatsen in de vaargeul gebaggerd (in de Westerschelde ongeveer  $8-11 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ ). Het in de Westerschelde gebaggerde sediment, veelal fijn zand, wordt in het estuarium teruggestort. Het baggeren

---

en storten ten behoeve van het vaargeulonderhoud en het winnen van zand voor en door de markt, beïnvloedt in eerste instantie de morfologische ontwikkeling van de geulen. Uit eerdere studies (o.a. Winterwerp et al., 2000; Wang en Winterwerp, 2001) is gebleken dat vooral het storten van baggerspecie kritisch kan zijn voor de instandhouding van het twee geulensysteem, ook wel aangeduid als de stabiliteit van het geulsysteem. Het langdurig storten van sedimenthoeveelheden die groter zijn dan de stortcapaciteit van het geulsysteem, kan leiden tot een zichzelf versterkend proces van sedimentatie in de geul waar te veel gestort wordt waardoor deze geul kan verzanden.



---

### *III De ontwikkeling van de intergetijdengebieden.*

Intergetijdengebieden zijn de gebieden die gelegen zijn tussen gemiddeld hoogwater en gemiddeld laagwater en dus ieder getij droogvallen. De intergetijdengebieden worden op basis van hun geografische locatie onderverdeeld in platen, gelegen tussen de geulen, en het slik langs de randen van het estuarium. De platen en slikken zijn belangrijke foerageergebieden voor vogels en spelen daardoor een prominente rol in het ecologisch functioneren en de Natuurlijkheid van het estuarium. Voor de ecologie zijn vooral veranderingen in het areaal intergetijdengebieden van belang. Ook vanuit het oogpunt van Veiligheid zijn de intergetijdengebieden belangrijk omdat ze zorgen voor een dissipatie van de getijenergie en daarmee de sterkte van de getijdoordringing en de extreme hoogwaterstanden in het estuarium beïnvloeden.

### *IV De ondiepwatergebieden*

Naast het intergetijdengebied is de ontwikkeling van het areaal ondiepwatergebied van belang. Dit gebied wordt vaak gedefinieerd als het gebied tussen het niveau van NAP-2m en NAP-5m en kan daarmee worden geclassificeerd als een subgetijdengebied (permanent onder water). Deze ondiepwatergebieden vervullen een kinderkamerfunctie voor jonge vis en garnaal waardoor zij van groot ecologisch belang zijn.

In de voorgaande alinea's is op hoofdlijnen aangegeven waarom het meergeulensysteem van belang is voor de Veiligheid, Toegankelijk en Natuurlijkheid in het estuarium en welke morfologische aspecten hierbij van belang zijn. Het evalueren van de instandhouding van het meergeulensysteem, als functie van genoemde projecten en maatregelen, moet zich minimaal richten op de volgende vragen:

1. Hoe ontwikkelt de zandhuishouding van het meergeulensysteem zich?
2. Hoe verandert de stabiliteit van het systeem van hoofd- en nevengeulen en hiermee samenhangend:
  - a. Wat is de invloed van het vaargeulonderhoud en de zandwinning op de stabiliteit van het geulsysteem?
  - b. Hoe groot zijn de onderhoudsbaggerhoeveelheden die vereist zijn om de vaargeul naar Antwerpen toegankelijk te houden, in de huidige situatie en na een verdere verdieping?
  - c. Waar kan de specie het beste worden gestort vanuit het oogpunt van de stabiliteit van het geulsysteem?
3. Op welke wijze verandert het intergetijdengebied, het areaal in het bijzonder?
4. Op welke wijze verandert het areaal ondiepwatergebied?

## **1.3 Doelstelling en algemene aanpak van het morfologisch onderzoek**

Het morfologisch onderzoek richt zich op het bepalen van de morfologische veranderingen van het meergeulensysteem voor de volgende projecten en maatregelen:

- 1) Een voortzetting van het huidige en voorgenomen beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning, het referentie-/nulalternatief,
- 2) een verdere verruiming van de vaargeul waarbij de volgende drie toegankelijkheidsalternatieven worden onderzocht:
  - a) Een verdieping van de vaargeul waarmee een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 13.1 m wordt gerealiseerd (minimale waterdiepte van GLLWS-14,7m)?

- 
- b) Een verdieping van de vaargeul waarmee een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 12.8 m wordt gerealiseerd (minimale waterdiepte van GLLWS-14,4m)?
  - c) Een verdieping van de vaargeul waarmee een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 12.5 m wordt gerealiseerd (minimale waterdiepte van GLLWS-14,1m)?
- 3) uitpolderingen langs de Westerschelde als maatregel voor natuurontwikkeling. Concreet gaat het hierbij om de uitpoldering van: i) de Braakman en ii) een combinatie van vijf kleine uitpolderingen ('Hals van Zuid-Beveland').

Bij al deze alternatieven dient de hoofddoelstelling, zoals beschreven in paragraaf 1.2 en vertaald naar de onderzoeksvragen 1 t/m 4, gewaarborgd te worden.

Onze huidige kennis is ontoereikend en onze onderzoeksmiddelen zijn onvoldoende ontwikkeld en gevalideerd om de morfologische ontwikkelingen van het Schelde-estuarium met grote mate van detail, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid te voorspellen. Daarom is gekozen voor een onderzoeksstrategie waarbij vooral wordt gekeken naar veranderingen en niet naar de absolute toestand. De morfologische effecten volgens het nulalternatief (Hoofdstuk 5) worden beschouwd ten opzichte van de huidige en historische morfologische referentie (Hoofdstuk 4). De verdiegings- en de uitpolderingsalternatieven (Hoofdstukken 7 en 6) worden vervolgens geëvalueerd t.o.v. het nulalternatief. Hierbij nagegaan in hoeverre de waargenomen tendensen in de morfologische ontwikkelingen zich voortzetten, versterken of verzwakken of dat er nieuwe tendensen ontstaan.

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen zijn verschillende onderzoeksmiddelen, met elk hun eigen specifieke merites en beperkingen (Hoofdstuk 3) naast elkaar gebruikt. Op deze wijze krijgen we een kwalitatief inzicht in de onzekerheden van de onderzoeksresultaten.

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen 1 t/m 4 wordt gebruik gemaakt van een aantal morfologische en enkele hydrodynamische indicatoren (zie Hoofdstuk 2). Het voorliggende rapport is het hoofdrapport van het morfologisch onderzoek. In het kader van het morfologisch onderzoek, zijn naast dit rapport nog twee andere rapporten verschenen:

- Een rapport van het vooronderzoek naar het verbeteren van de stortstrategie en het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk in de Westerschelde (Tanczos et al., 2004). Dit onderzoek is uitgevoerd om de onderzoeksvragen 2b en 2c te beantwoorden. De resultaten van deze voorstudie worden in dit hoofdrapport als uitgangspunt gebruikt.
- Een executive summary gebaseerd op het voorliggende rapport en het vooronderzoek (Winterwerp en Jeuken, 2004).

---

## 2 Indicatoren

### 2.1 Inleiding

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen 1 t/m 4 wordt gebruik gemaakt van een aantal morfologische en enkele hydrodynamische indicatoren die een relatie hebben met de waterbeweging en het sedimenttransport (zie Tabel 2-1). De morfologische indicatoren geven veelal direct antwoord op de vragen 1 t/m 4 (paragraaf 1.2). De hydrodynamische indicatoren worden gebruikt bij het verklaren, c.q. interpreteren van de morfologische veranderingen. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de indicatoren zijn gedefinieerd.

**Tabel 2-1 Indicatoren per onderzoeksvraag**

Vraag	Morfologische indicator	Hydrodynamische indicator
1. Hoe verandert de zandhuishouding?	<ul style="list-style-type: none"><li>o Zandbalans in diverse deelgebieden, de zogenaamde morfologische eenheden</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>o Getijvolume</li><li>o Getijslag</li><li>o Getij-asymmetrie van het verticale getij</li></ul>
2. Hoe verandert de stabiliteit van het geulsysteem	<ul style="list-style-type: none"><li>o De gemiddelde diepte van de geulen</li><li>o De kantelingindex van een twee-geulensysteem.</li><li>o Het netto geërodeerde of gesedimenteerde volume zand per geul</li><li>o Het netto zandvolume van de ingrepen (baggeren, storten en zandwinnen) per geul</li><li>o Afgeleide natuurlijke volumeveranderingen per geul</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>o Getijvolume</li><li>o Vervallen en verhangen</li><li>o Stroomsnelheden</li></ul>
3. Hoe verandert het intergetijdengebied?	<ul style="list-style-type: none"><li>o Het areaal intergetijdengebied</li><li>o Het zandvolume in de intergetijdengebieden</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>o Hoogwaterniveau</li><li>o Laagwaterniveau</li><li>o Getijslag</li></ul>
4. Hoe verandert het areaal ondiepwatergebied?	<ul style="list-style-type: none"><li>o Het areaal ondiepwatergebied</li></ul>	

### 2.2 Morfologische indicatoren

#### De zandhuishouding

Om de veranderingen in de zandhuishouding te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van een *zandbalans*. Een zandbalans beschrijft hoeveel zand er in een bepaald (deel)gebied bijkomt (sedimentatie) of verdwijnt (erosie) en waar dat zand vandaan komt dan wel verdwijnt, i.e. de zanduitwisseling tussen deelgebieden.

---

In de voorliggende studie wordt een zandbalans opgesteld waarbij vooral het meergeulensysteem wordt onderverdeeld in zogenaamde morfologische eenheden (zie Figuur 2-1). Deze eenheden worden in essentie gevormd door de verschillende bochtgroepen (paragraaf 4.3, Figuur 2-2). De zandbalans wordt als volgt opgesteld:

Allereerst worden per deelgebied de volgende drie volumeveranderingen (zand in  $\text{Mm}^3/\text{jr}$ ) bepaald:

1. De *totale volumeverandering*  $DV_{\text{tot}}$  onder  $\text{NAP}+3.5\text{m}$ . Deze volumeverandering is het gevolg van natuurlijke processen en ingrepen en volgt rechtstreeks uit een dieptekaart of een modelberekening.  $\Delta V_{\text{tot}} < 0$  duidt op een erosie en  $\Delta V_{\text{tot}} > 0$  op een sedimentatie van zand.
2. De *netto volumeverandering ten gevolge van de ingrepen vaargeulonderhoud en zandwinning*,  $DV_i$ . Dit is de som van storten en baggeren ten behoeve van vaargeulonderhoud en zandwinning.  $\Delta V_i < 0$  betekent netto baggeren en  $\Delta V_i > 0$  betekent netto storten.
3. Het verschil tussen bovengenoemde twee volumes wordt de *afgeleide natuurlijke volumeverandering*,  $DV_{\text{nat}}$  genoemd ( $DV_{\text{nat}} = DV_{\text{tot}} - DV_i$ ). Of dit het werkelijk natuurlijke effect is zullen we waarschijnlijk nooit weten. Hierbij betekent  $\Delta V_{\text{nat}} < 0$  een natuurlijke erosie van zand en  $\Delta V_{\text{nat}} > 0$  een natuurlijke sedimentatie van zand.

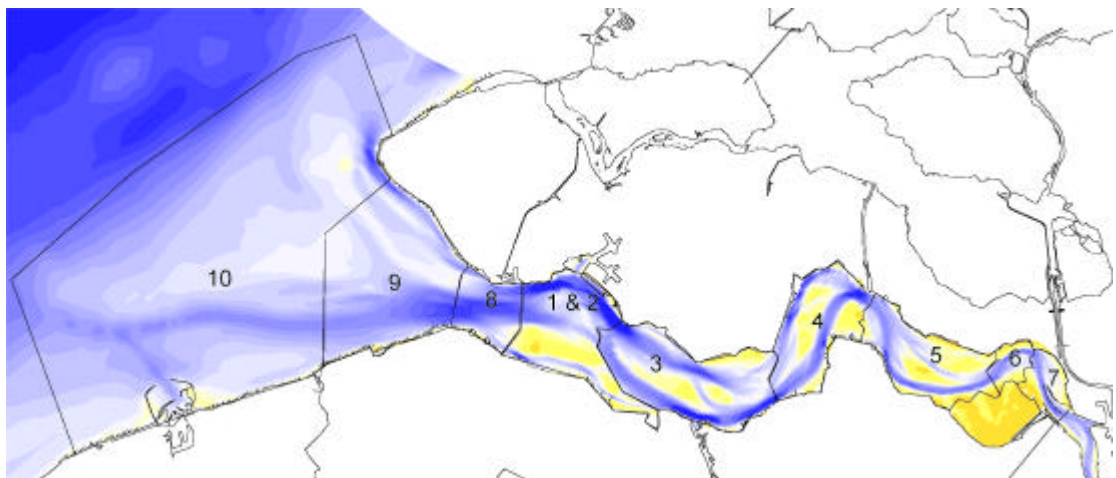
Voor het bepalen van de sedimenttransporten op de zeewaartse rand van ieder deelgebied worden de volgende drie aannamen gedaan (zie ook Jeuken et al, 2003):

- a. Het transport op de grens Nederland-België is gelijk aan 0, conform diverse eerdere zandbalansstudies (zie bijvoorbeeld Uit den Bogaard, 1993; De Jong, 2000).
- b. In het Land van Saeftinghe sedimenteert jaarlijks  $0.3 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ , waarbij het sediment afkomstig is uit gebied 5.
- c. Het sediment dat in het vaarwater langs Hoofdplaat (mesocellen gebied 2) wordt afgezet of gesedimenteerd komt via het mondingsgebied (vak 8 in Figuur 2-1) binnen. De sedimentuitwisseling tussen de ebgeul Pas van Terneuzen (cel 3) en deze nevengeulen wordt verwaarloosd (=0).

Het sedimenttransport op de zeewaartse rand van ieder deelgebied,  $T$  (in  $\text{Mm}^3/\text{jr}$ ) kan worden bepaald door de natuurlijke inhoudsveranderingen van die cel en de landwaarts gelegen cellen bij elkaar op te tellen. Dus bijvoorbeeld, het transport op de zeewaarts gelegen rand van gebied 5,  $T_{\text{gebied 5}}$ , is gelijk aan

$$T_5 = \Delta V_{\text{nat},5} + \Delta V_{\text{nat},6} + \Delta V_{\text{nat},7}$$

Een negatieve waarde van  $T$  duidt op een naar zee gericht transport ('export') een positieve waarde betekent een landwaarts gericht transport ('import').



**Figuur 2-1 Vakkenindeling voor het opstellen van een zandbalans**

---

---

---

Het vaargeulonderhoud en de zandwinning beïnvloeden de zandhuishouding en de ontwikkeling van het meergeulensysteem. Om te beoordelen in welke mate deze ingrepen van invloed zijn op de voorspelde dan wel waargenomen netto erosie of sedimentatie (één aspect van de morfologische evoluties) wordt gekeken naar het teken van *de totale volumeverandering*  $DV_{tot.}$  en de *afgeleide natuurlijke volumeverandering*  $DV_{nat.}$  per geul (voor definities zie zandbalans). Wanneer deze volumeveranderingen een duidelijk tegengesteld teken hebben kunnen de ingrepen als sturend voor de ontwikkeling worden beschouwd. Wanneer beide volumeveranderingen hetzelfde teken hebben kunnen de ingrepen wel invloed hebben gehad op de morfologische verandering. Ze zijn in dat geval waarschijnlijk niet bepalend geweest voor de richting van de verandering (zie ook Jeuken et al, 2003). Hierbij moet worden opgemerkt dat deze methode vooral voor de analyse van veldwaarnemingen wordt toegepast. De methode van het kwalificeren van ingrepen op basis van volumeveranderingen heeft onzekerheden in zich die niet te kwantificeren zijn omdat we niet weten wat de werkelijke natuurlijke veranderingen zijn door alle ingrepen die zijn en worden uitgevoerd. In modelstudies kan de invloed van ingrepen op de voorspelde morfologische ontwikkeling ook worden geschat door het vergelijken van simulaties met en zonder ingrepen. Voor het nulalternatief worden beiden methoden toegepast.

### **De stabiliteit van de grote eb- en vloedgeulen**

De stabiliteit van de geulsystemen in de macrocellen voor relatief kleine verstoringen wordt bepaald door het evenwicht tussen de transportcapaciteit van elk van de geulen onderling en van het geulstelsel als geheel. Een kleine verondieping (door storten) in één van de geulen leidt lokaal tot het vernauwen van de geuldoorsnede en daarmee tot het vergroten van de lokale stroomsnelheid, waardoor de transportcapaciteit toeneemt, en de verondieping geërodeerd wordt. Dit is een stabiele situatie. Wanneer echter de verondieping een zekere grootte overschrijdt, neemt de hydraulische ruwheid in de geul snel toe, met als gevolg dat er minder water door de verondiepte geul, en meer water door de verdiepte geul stroomt. Het gevolg is dan een afnemende transportcapaciteit in de verondiepte geul. Dit is een zichzelf versterkend proces: de verondiepte geul wordt steeds (sneller) ondieper waardoor de geul bij voldoende beschikbaar sediment kan degenereren. Dit is een instabiele situatie, die vanuit het oogpunt van de instandhouding van het dynamische meergeulensysteem niet mag optreden.

De lengte en breedte van de grote eb- en vloedgeulen kunnen slechts weinig veranderen door de zeer beperkte bewegingsvrijheid van de geulen (ingeklemd tussen dijken, geulwandverdedigingen). Veranderingen in stabiliteit van de grote geulen zullen daarom vooral tot uitdrukking komen in een verandering van de diepte van de geulen. Daarom wordt voor het bepalen van veranderingen in de stabiliteit van het geulstelsel in de tijd gebruik gemaakt van de volgende morfologische indicatoren:

1. De *gemiddelde diepte van de grote ebgeulen en de vloedgeulen*, gedefinieerd als,

$$\text{diepte (in m NAP)} = \frac{\text{watervolume onder NAP} - 2m}{\text{wateroppervlakte op NAP} - 2m} + 2$$

Hierbij zijn de geulen gedefinieerd als de gebieden beneden NAP-2m. Het watervolume heeft betrekking op het totale watervolume inclusief de effecten van de ingrepen.

2. De *kantelingindex*  $K$ ,

---


$$K(t) = \ln \left( \frac{\textit{diepteebgeul}(t)}{\textit{dieptevloedgeul}(t)} \right)$$



---

Deze index geeft aan hoe de diepte van de grote ebgeul en de vloedgeul in een bochtgroep zich op een bepaald tijdstip verhouden. Door de natuurlijke logaritme van de diepteverhouding te gebruiken varieert de waarde van  $K$  tussen min oneindig en plus oneindig. Een positieve waarde van  $K$  betekent dat de ebgeul dieper is dan de vloedgeul. Een verandering van de kantelingindex in de tijd, het kantelen van het geulsysteem, betekent dat de stabiliteit van het geulsysteem verandert. Een toename van  $K$  betekent dat de diepte van de ebgeul toeneemt ten opzichte van de vloedgeul. Deze toename kan het gevolg zijn van een erosie van de ebgeul zelf, of door sedimentatie van de vloedgeul. Een combinatie van beide is ook mogelijk.

Om te beoordelen hoe de stabiliteit van het geulsysteem verandert en of deze gewaarborgd is wordt gebruik gemaakt van de tijdreeksen van de gemiddelde diepte in de geulen *in combinatie* met tijdreeksen van de kantelingindex. De tijdreeks van de kantelingindex geeft aan hoe de stabiliteit van het geulsysteem verandert: in welke richting het systeem kantelt en hoeveel het systeem kantelt. De veranderingen in de gemiddelde diepte worden gebruikt om na te gaan of de stabiliteit gewaarborgd is:

Wanneer een kanteling van het geulsysteem gepaard gaat met een in de tijd steeds sneller afnemende diepte in één van beide geulen is er sprake van een zichzelf versterkend sedimentatie- en kantelingproces, een instabiele situatie. Ook een langdurige (niet zichzelf versterkende) afname van de waterdiepte in één van beide geulen is een situatie die vanuit het waarborgen van de stabiliteit van het meergeulensysteem niet mag optreden.

Een kanteling van het geulsysteem waarbij één van beide geulen steeds dieper wordt door baggeren duidt ook op een verandering van de stabiliteit van het geulsysteem. Volgens theoretische analyses leidt een dergelijke verandering niet tot een instabiele situatie en een degeneratie van het geulsysteem in de macrocellen (Wang en Winterwerp, 2001).

De invloed van het vaargeulonderhoud en de zandwinning op de erosie van en de sedimentatie in de geulen kan op dezelfde manier worden gekwalificeerd als beschreven bij de zandbalans.

### **De aanwezigheid van kortsluitgeulen**

De kantelingindex wordt ook gebruikt om een uitspraak te doen over veranderingen in de aanwezigheid van kortsluitgeulen, de kleinere geulen die een verbinding vormen tussen de grote eb- en vloedgeul (zie ook paragraaf 4.3). De verschillen in geometrische verschillen (lengte, diepte en breedte) tussen de grote eb- en vloedgeul gaan gepaard met dwarsverhangen tussen deze geulen. Deze dwarsverhangen zijn de aandrijvende kracht voor de waterbeweging in en de morfologische verandering van de kortsluitgeulen. Veranderingen in de morfologie van de grote eb- en vloedgeulen, door natuurlijke processen en menselijke ingrepen, kunnen daarom leiden tot morfologische veranderingen van de kortsluitgeulen. Omdat de verschillen in lengte en breedte tussen de eb- en vloedgeul op de meeste plaatsen weinig kunnen veranderen (zie boven), zijn vooral veranderingen in de verschillen in diepte tussen de eb- en vloedgeul, i.e. veranderingen in de kantelingindex, van belang voor het dwarsverhang tussen de geulen.

De interpretatie van de kantelingindex in termen van veranderingen in dwarsverhangen is gebaseerd op de geverifieerde aanname dat de voortplantingstijd van de getijgolf langs de langere gekromde ebgeulen groter is dan langs de korte rechte vloedgeulen. Dit betekent dat,

$$L_{\text{ebgeul}} / v(g \cdot h_{\text{ebgeul}}) > L_{\text{vloedgeul}} / v(g \cdot h_{\text{vloedgeul}})$$

Met,

$L_{\text{ebgeul}}$  = lengte van de ebgeul

$L_{\text{vloedgeul}}$  = lengte van de vloedgeul

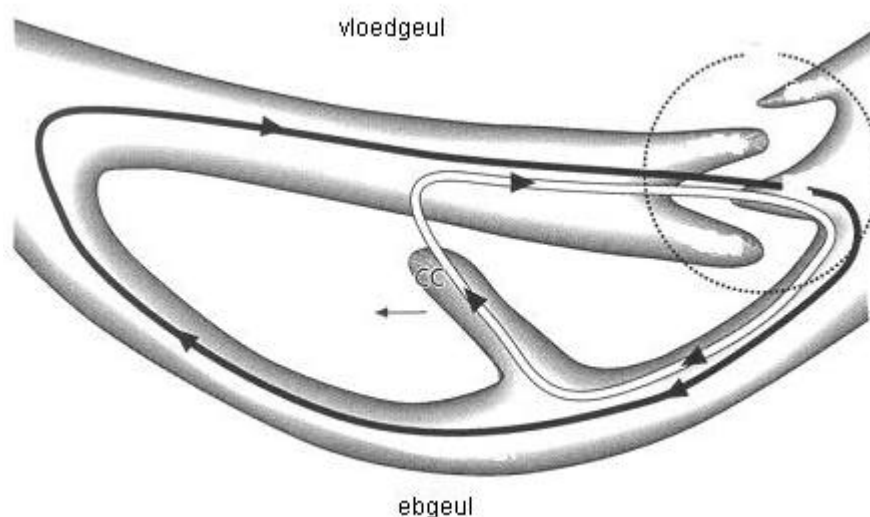
$h_{\text{ebgeul}}$  = gemiddelde diepte in de ebgeul

$h_{\text{vloedgeul}}$  = gemiddelde diepte in de vloedgeul

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Uit een analyse van de morfologische situatie in 2001, de historische waarnemingen van 1931 en de meer continue reeks waarnemingen sinds 1955, blijkt dat alle bochtgroepen van het meergeulstelsel in de Westerschelde aan deze aanname voldoen. Alleen bochtgroep 5, het Valkenisse-gebied (Figuur 2-1), voldeed niet aan deze aanname gedurende de periode 1975-1985, toen er ook geen kortsluitgeulen in dit gebied aanwezig waren. Dit betekent dat veranderingen van de kantelingindex als volgt kunnen worden geïnterpreteerd:

Wanneer de diepte van de langere ebgeul toeneemt ten opzichte van diepte in de vloedgeul, een kanteling richting ebgeul, nemen dwarsverhangen tussen de eb en vloedgeul af. Hierdoor zullen de stroomsnelheden (en debieten) in de kortsluitgeulen afnemen met een sedimentatie als gevolg. Een kanteling van het geulsysteem richting de vloedgeul zal over het algemeen, gepaard gaan met een toename van dwarsverhangen en een erosie in de kortsluitgeulen, dan wel een toename van het aantal kortsluitgeulen. Dit mechanisme is van toepassing op de kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul en op de kortsluitgeulen die de platen doorsnijden (zie Figuur 2-3).



**Figuur 2-2 Geschematiseerde morfologie van een bochtgroep (Jeuken, 2000). De grote gekromde geul is de ebgeul. De grote rechte geul is de vloedgeul. CC is een kortsluitgeul die de platen doorsnijdt. Het omcirkelde gebied is het drempelgebied met kortsluitgeulen.**

Tot slot geldt voor gebied 3 dat de ontwikkelingen van de kortsluitgeul die de intergetijdengebieden (CC in Figuur 2-2) en de kortsluitgeulen in het drempelgebied nauw met elkaar samenhangen (Jeuken, 2000): een verdieping van het drempelgebied onder invloed van de kortsluitgeulen in dit gebied gaat gepaard met een sedimentatie in de kortsluitgeul CC, en omgekeerd. Een verondieping van de drempel leidt juist tot erosie in de kortsluitgeul CC.

### De ontwikkeling van de intergetijdengebieden

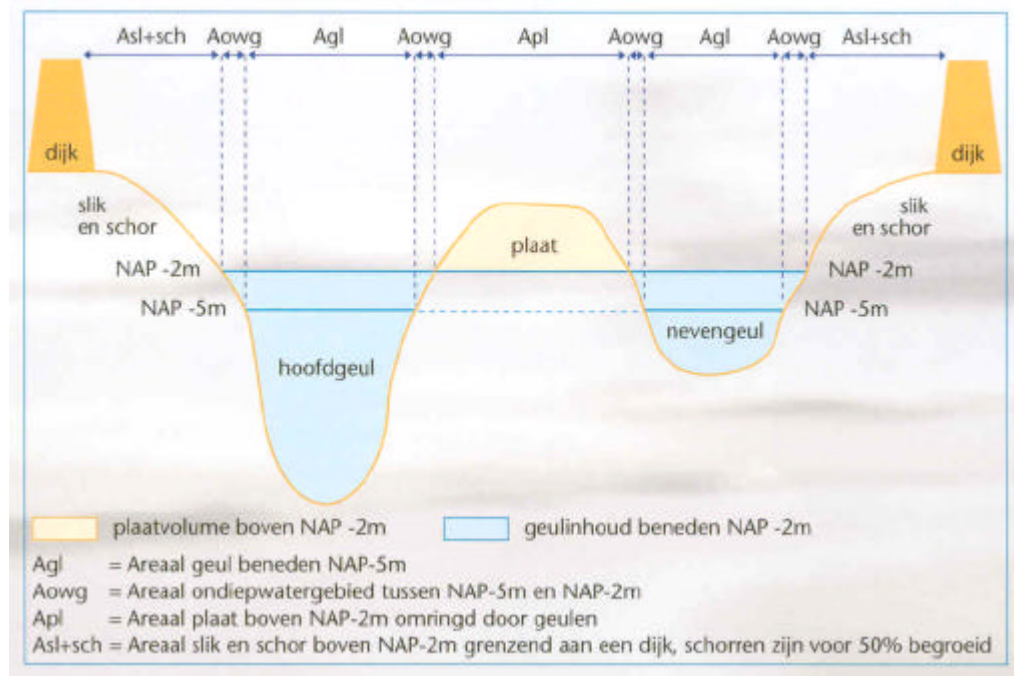
Voor het evalueren van de ontwikkeling van de intergetijdengebieden worden twee indicatoren gebruikt:

- Het areaal intergetijdengebied.
- Het zandvolume van de intergetijdengebieden (ten behoeve van de interpretatie van veranderingen in de zandhuishouding).

Om deze indicatoren volledig correct te kunnen bepalen moet worden uitgegaan van het in de tijd en ruimte variërende laagwater en hoogwaterniveau. In de tot dusver uitgevoerde analyses van de historische ontwikkelingen van het intergetijdengebied is dit echter niet gedaan. De recente analyses van Stickvoort et al. (2003) gaan uit van een vast referentieniveau op NAP-2m voor de definitie van de intergetijdengebieden (Figuur 2-3). In deze studie worden de voorspelde ontwikkelingen van de intergetijdengebieden (plaat en slik samen) bepaald ten opzichte van vaste en variabele referentievlakken.

### Het areaal ondiepwatergebied

Het areaal ondiepwatergebied is gedefinieerd als het gebied tussen NAP-2m en NAP-5m (zie Figuur 2-2).



**Figuur 2-3 Definitie van platen, slikken schorren en ondiep water gebied (ontleend aan Stickvoort et al, 2003).**

---

## 2.3 Hydrodynamische indicatoren

Bij de interpretatie van de morfologische veranderingen worden enkele hydrodynamische indicatoren gebruikt die als volgt gedefinieerd zijn:

- De getijslag (in m) is het waterstandsverschil tussen het niveau van hoogwater en het niveau van laagwater.
- Het getijvolume is de hoeveelheid water (in m<sup>3</sup>) die tijdens eb en vloed door de dwarsdoorsnede van het estuarium of een individuele geul stroomt.
- Getij-asymmetrie van het verticale getij. Hiermee wordt bedoeld het verschil in de tijdsduur van de vloedperiode, waarin het waterniveau stijgt van laagwater naar hoogwater, en de ebperiode, waarin het waterniveau daalt van laagwater naar hoogwater.
- Het verval is het waterstandsverschil tussen twee locaties. Het verhang is gedefinieerd als het verval gedeeld door de afstand tussen de twee locaties.

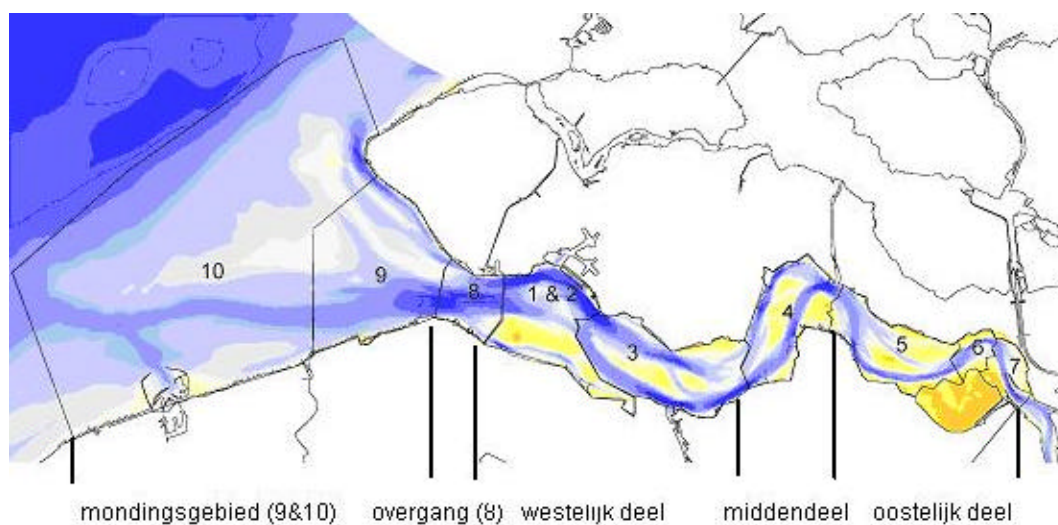
## 2.4 Geografische definities

In dit rapport wordt voor de beschrijving van de ontwikkelingen van het meergeulensysteem een aantal geografische benamingen gebruikt. Deze zijn samengevat in Tabel 2-2 en op hoofdlijnen weergegeven in Figuur 2-4. Alle geulen van het meergeulensysteem hebben een naam. Deze worden echter slechts sporadisch gebruikt omdat slechts weinig mensen deze namen kennen en kunnen plaatsen. In plaats daarvan worden de vereenvoudigde locatieaanduidingen volgens Tabel 2-2 gebruikt.

**Tabel 2-2 Geografische benamingen**

Deelgebied	Bochtgroep / cellen		Ebgeul		Vloedgeul	
	nummer	Naam/gelegen nabij	code	naam	code	Naam
Westelijk deel	1&2	Vlissingen	1e	Honte met de drempel van Vlissingen	1v	Schaar van de Spijkerplaat met kortsluitgeul ebschaar naar de Spijkerplaat
	3	Terneuzen	3e	Pas van Terneuzen met de drempel van Borssele	3v	Everingen met de korstluitgeulen: Zuid-Everingen en de ebschaar naar de Everingen
Middendeel	4	Hansweert	4e	Middelgat met drempel van Baarland	4v	Gat van Ossenis en Overloop van Hansweert
Oostelijk deel	5	Valkenisse-gebied	5e	Zuidergat en Overloop van Valkenisse met de drempel van Hansweert	5v	Schaar van Valkenisse en Schaar van Waarde en Zimmermangeul
	6	Bath	6e	Nauw van Bath met de drempel van Valkenisse	6v	Schaar van de Noord
	7	Grens	7e	Vaarwater boven Bath	7v	Appelzak (sinds 1970)

					gescheiden van de ebgeul door een leidam)
--	--	--	--	--	---



**Figuur 2-4 Geografische benamingen (zie ook Tabel 2-2).**

---

## 3 Onderzoeksmiddelen

### 3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft welke onderzoeksmiddelen er worden gebruikt om de vragen die centraal staan in dit onderzoek te kunnen beantwoorden (zie Hoofdstuk 1).

De beschikbare middelen voor het uitvoeren van het morfologisch onderzoek bestaan uit twee componenten:

1. fenomenologische kennis op basis van literatuurstudies en analyses van historische waarnemingen (zie ook Hoofdstuk 3), en
2. een samengesteld morfologisch modelinstrumentarium. Een allesomvattend morfologisch model van het Schelde-estuarium bestaat niet, daarom wordt in de huidige studie gebruik gemaakt van verschillende typen modellen (zie Figuur 3-1) met ieder hun eigen specifieke merites en beperkingen:
  - a) het operationele semi-empirische ESTMORF model (1D-netwerk model),
  - b) een proces-georiënteerd SOBEK model (1D-netwerk model), en
  - c) een proces-georiënteerd 3D DELFT3D model.

In het vooronderzoek (Tanczos et al., 2004) is naast bovengenoemde modellen ook nog het semi-empirisch '1-element model' ingezet voor het voorspellen van onderhoudsbaggerwerk in de Westerschelde bij een verruiming. Omdat dit van belang is voor de bespreking van de verruimingsalternatieven zal dit model hieronder ook kort worden besproken.

Het Cellenconcept wordt gebruikt bij de analyse van de waargenomen en voorspelde morfologische ontwikkelingen. Het Cellenconcept bestaat uit een schematisatie van het meergeulensysteem in morfologische eenheden (de bochtgroepen of "cellen") bestaande uit paren eb- en vloedgeulen en de tussenliggende intergetijdengebieden waarmee de morfologische ontwikkeling op een hoog abstractieniveau geanalyseerd en gepresenteerd kan worden. Het Cellenconcept is gebaseerd op een stabiliteitsanalyse van de individuele morfologische eenheden en berekende sedimenttransporten in die eenheden. Het is gekalibreerd tegen historische waarnemingen van de respons van het meergeulensysteem op vigerende stortstrategieën (Jeuken, 2001, Jeuken et al., 2003) en tegen SOBEK berekeningen (Tanczos et al, 2002, voor verdere informatie zie Bijlage A).

Tot slot, moet worden benadrukt dat voor alle modellen geldt dat zij 'slechts' hulpmiddelen zijn bij het bepalen van de toekomstige morfologische ontwikkeling van het systeem. Alle modelresultaten moeten logisch en verklaarbaar zijn. De belangrijkste principes, toepassingsmogelijkheden en beperkingen van de verschillende morfologische modellen worden in de navolgende paragrafen kort uiteengezet.

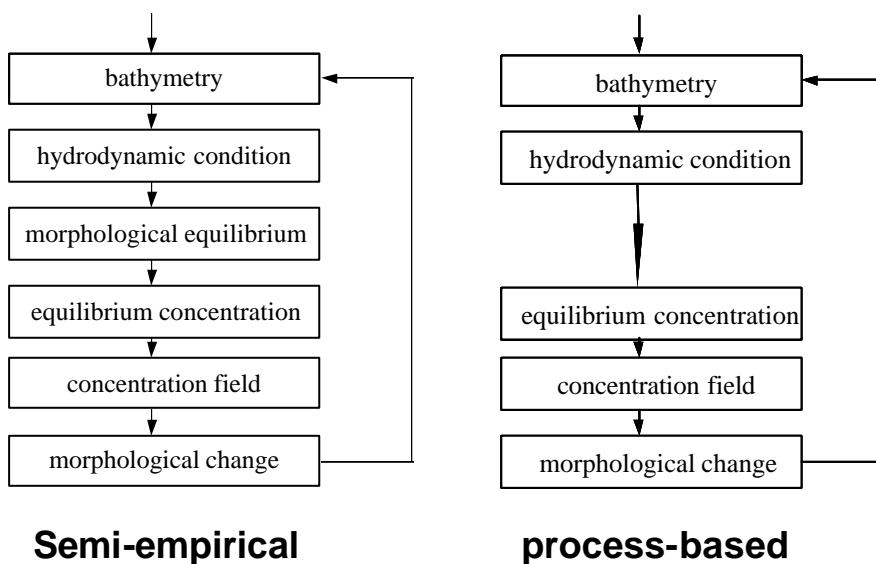
### 3.2 ESTMORF-model

Een belangrijk deel van de voorspellingen / evaluatie in deze studie wordt uitgevoerd met behulp van ESTMORF, een wiskundig model voor lange-termijn (decaden) morfologische ontwikkeling van estuaria. Het model is ontwikkeld door WL | delft Hydraulics in samenwerking met RIKZ, Rijkswaterstaat. Het model is speciaal ontworpen om lange-termijn morfologische ontwikkelingen van estuaria en getijdenbekkens onder invloed van natuurlijke ontwikkelingen, zoals zeespiegelrijzing en menselijke invloeden, zoals landwinning / ontpoldering en baggeren / storten. Hoewel het model al voor veel andere

gebieden binnen en buiten Nederland is toegepast, was het model oorspronkelijk ontwikkeld voor de Westerschelde. Het ESTMORF-Westerschelde model is gekalibreerd met de historische gegevens over de periode 1968-1998. Bij aanvang van de huidige studie was het ESTMORF model het enige operationele morfologische model voor het Schelde estuarium.

ESTMORF is een semi-empirisch model, dat in de literatuur ook als een hybride model wordt aangeduid. Het combineert de beschrijving van fysische processen (hydrodynamica en sedimenttransport) en de empirische relaties voor morfologisch evenwicht, om lange-termijn morfologische ontwikkelingen te simuleren. Het model gebruikt een eendimensionaal netwerk hydrodynamisch model (SOBEK) om getijstroming te simuleren. De berekende stromingsgegevens worden gebruikt om morfologisch evenwicht van zowel de geulen als de intergetijdengebieden te definiëren aan de hand van empirische relaties. De afwijkingen van de aanwezige morfologische toestand t.o.v. het morfologische evenwicht, samen met de kenmerken van de getijstroming, bepalen het sedimenttransport en de morfologische veranderingen.

Het model berekent morfologische veranderingen van zowel de geulen als de intergetijdengebieden. Het dwarsprofiel van een tak in het netwerk wordt in drie delen verdeeld, het geuldeel, het lage intergetijdengebied (tussen laagwater en gemiddeld waterniveau) en het hoge intergetijdengebied (tussen gemiddeld waterniveau en hoogwater). Voor het geuldeel wordt het evenwicht van de dwarsdoorsnede gerelateerd aan het getijvolume. Voor de twee delen van het intergetijdengebied wordt het evenwicht van de hoogte t.o.v. laagwater gerelateerd aan het getijverschil. De sedimentatie / erosie van de drie delen van het profiel wordt apart berekend.



**Figuur 3-1 Het principe van een semi-empirisch- en proces model.**

De rekenprocedure van het semi-empirische ESTMORF model is schematisch weergegeven in Figuur 3-1.

Ter vergelijking is die van een proces-gebaseerd model (zoals SOBEK en DELFT3D) ook weergegeven in het model. Het belangrijkste verschil tussen de twee typen modellen is dat bij een semi-empirisch model het sedimenttransport niet direct uit waterbewegingsgegevens wordt berekend, zoals bij proces-gebaseerd model, maar gerelateerd wordt aan het morfologische evenwicht. Door de aanwezig morfologische toestand met het morfologische

---

evenwicht te vergelijken, wordt bepaald of een gebied in evenwicht is, of het wil sedimenteren (sedimenttekort), of dat het gebied wil eroderen (sedimentoverschot). In een gebied waar een sedimenttekort is hoeft geen sedimentatie op te treden. Dat hangt af van de toestand van de omgeving af. Als de omgeving een nog groter sedimenttekort heeft moet het gebied juist eroderen om sediment aan de omgeving te kunnen leveren. In ESTMORF is het netto sedimenttransport in de richting van de gradiënt van het sedimenttekort. Het semi-empirische model berekent direct het netto sedimenttransport terwijl in een proces-gebaseerd model het sedimenttransport per tijdstap binnen een getijperiode wordt berekend. Het ESTMORF model is verder zodanig geformuleerd dat in geval van rivierstroming zonder getij de twee typen modellen in principe hetzelfde worden.

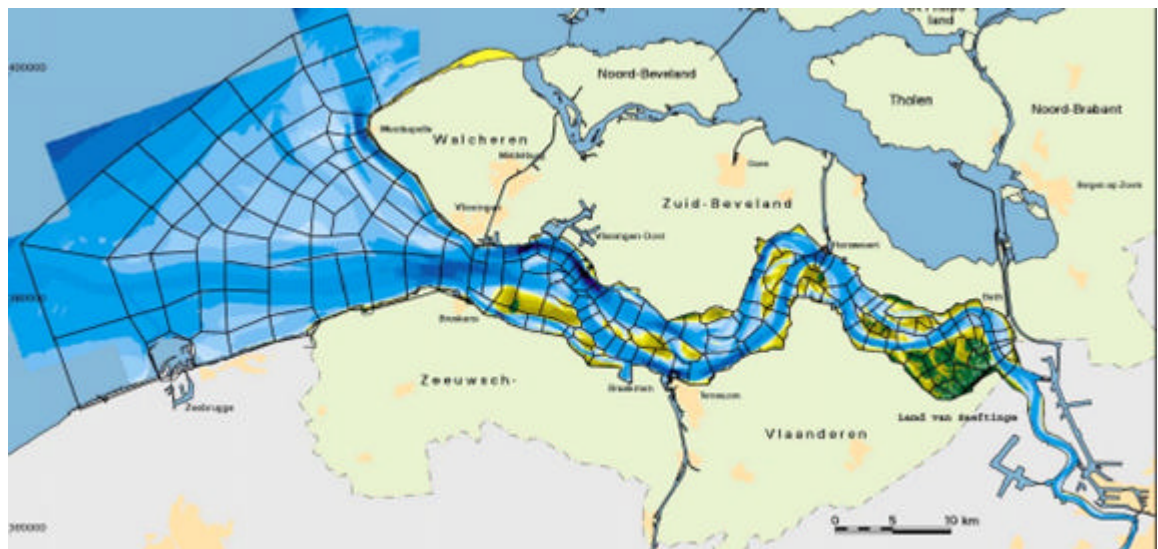


---

ESTMORF is ontwikkeld sinds het begin van de jaren negentig en in middels in verschillende advies- en onderzoeksprojecten toegepast. Binnen Nederland is het model behalve voor de Westerschelde ook toegepast voor Het Friesche Zeegat en Het Noordelijk Deltabekken. Buiten Nederland is het model toegepast voor Southampton Water (UK), het Humber Estuarium (UK), het Yangtze Estuarium (China), het Feiyun Estuarium (China), en Cochin (India). Het Westerschelde model is al voor verschillende studies gebruikt, o.a. de LTV studie en de MOVE-studie. Meer informatie over de modelformulering en de toepassingen van het model kan men vinden in het overall overview rapport van ESTMORF (Wang en Van Helvert, 2001) en de diverse publicaties (Wang et al, 1998, 1999, Wang en Roelfzema, 2001, Jeuken e.a., 2003, Shi e.a., 2003)

De bodem in het gevalideerde ESTMORF model beschrijft de situatie van 1968. Voor de huidige studie is deze bodem vervangen door de bodem van 2001. De procedure die hierbij gevolgd is wordt beschreven in Bijlage B.

Figuur 3-2 toont de netwerkschematisatie van het ESTMORF model. Het modeldomein omvat het gebied van de monding tot aan de sluizen in Gent. Voor dit hele gebied wordt de waterbeweging gesimuleerd. De morfologische berekeningen worden gemaakt voor het mondingsgebied en de Westerschelde. Voor de Zeeschelde wordt niet morfologisch gerekend omdat er destijds geen gegevens beschikbaar waren voor het morfologische kalibreren van dit gebied. Binnen de huidige studie ontbraken tijd en middelen om deze uitbreiding van het ESTMORF model te realiseren.



**Figuur 3-2 Netwerkschematisatie van het ESTMORF en SOBEK model met de bodemligging van 2001.**

In de huidige studie wordt het ESTMORF-Westerschelde model gebruikt voor het voorspellen van de:

- Lange-termijn (tot 30 jaar) veranderingen in de zandhuishouding van de Westerschelde en haar monding (beantwoording van onderzoeksvraag 1)
- Lange-termijn ontwikkelingen van de intergetijdengebied (arealen, zandvolumes, de beantwoording van onderzoeksvraag 3).
- Indicatieve lange-termijn veranderingen van het ondiepwatergebied via een vertaling naar het rooster van het DELFT3D model (bijlage C, de beantwoording van onderzoeksvraag 4).

---

---

---

Het ESTMORF model kent de volgende beperkingen:

- Met de gebruikte instellingen kan het ESTMORF model degeneratie van het meergeulensysteem onder invloed van baggeren en storten niet voldoende voorspellen. Dit komt doordat het evenwicht van het doorstroomoppervlak van de geulen is gerelateerd aan het totale getijvolume door de locale dwarsdoorsnede en dus door beide geulen. Hierdoor wordt bijvoorbeeld de kritische grens van storthoeveelheden in een twee-geulen-systeem overschat. Dit is de reden waarom in de huidige studie naast ESTMORF ook een SOBEK model wordt gebruikt.
- ESTMORF (en 1D-netwerkmodellen in het algemeen) kan geen nieuwe geulen laten ontstaan en migreren. Dit geldt ook voor het hieronder beschreven SOBEK-model. Dit betekent dat een deel van het morfologische gedrag van de kortsluitgeulen in de Westerschelde niet kan worden gesimuleerd.

### 3.3 Het SOBEK model

SOBEK is een integraal 1D-netwerk modelsysteem voor waterbeweging, waterkwaliteit, stof- en sedimenttransport en morfologische ontwikkelingen, ontwikkeld door WL | delft Hydraulics en Rijkswaterstaat. (zie <http://www.sobek.nl/>). In de huidige studie wordt het SOBEK behalve als stromingsmoduul binnen ESTMORF ook gebruikt voor het berekenen van sedimenttransport en morfologische ontwikkelingen (SOBEK-MOR).

SOBEK-MOR is een proces-gebaseerd model. Het sedimenttransport wordt direct uit waterbewegingsgegevens berekend na elke tijdstap van de stromingsberekening, aan de hand van een sediment transport formule (de formule van Van Rijn is gebruikt in de huidige studie). De gradiënt van sedimenttransport bepaalt de morfologische veranderingen. Om rekening te houden met het grote verschil tussen de morfologische en hydrodynamische tijdschalen en toch snel berekeningen te kunnen maken wordt het sedimenttransport met een factor  $N$  die (veel) groter is dan 1, vermenigvuldigd. Dit betekent dat na elke getijperiode de morfologische ontwikkeling van  $N$  getijperioden is berekend.

De modelformulering van SOBEK-MOR is het uitgangspunt van de stabiliteitsanalyse (Wang en Winterwerp, 2001) voor een vloed-eb geulensysteem, dat de basis vormt van het Cellenconcept ontwikkeld en gebruikt in de LTV-studie (Winterwerp et al, 2001, zie bijlage A). Voor de onderbouwing van het Cellenconcept is door Wang et al (2002) een sterk vereenvoudigd netwerkmodel voor de Westerschelde opgezet op basis van SOBEK-MOR. Met dit model zijn de verschillende hypothesen / aannames in het Cellenconcept getoetst. Uit deze studie is ook geconcludeerd dat bij het evalueren van het effect van bagger- en stortscenario's het hele estuarium integraal moet worden beschouwd i.p.v. elk cel afzonderlijk. Daarom is destijds aanbevolen om een netwerk model op basis van SOBEK-MOR voor het hele estuarium op te zetten. In de huidige studie is dit model opgezet, met dezelfde netwerkschematisatie als gebruikt in ESTMORF. Het model zal vooral worden gebruikt om de invloed van baggeren en storten op de stabiliteit van het meergeulensysteem in het estuarium te onderzoeken.

In het model wordt het estuarium geschematiseerd door het op te delen in vakken of takken (zie Figuur 3-2) die aan elkaar zitten d.m.v. zogenaamde *knopen*. De verdeling van het sedimenttransport op een splitsingspunt wordt bepaald door de zogenaamde *knooppuntrelatie*.

---


$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{k-1} \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^k$$

---

Hierin is  $S_n$  het sedimenttransport in-,  $B_n$ , de breedte van- en  $Q_n$  de waterafvoer in geul 1 ( $n=1$ ) en geul 2 ( $n=2$ ) (Wang et al., 1995). De grootte van de dimensieloze coëfficiënt  $k$  bepaalt de stabiliteit van het geulensysteem en is afhankelijk van de gebruikte transportformulering (Wang et al., 2002). Gezien het doeleinde van het model is deze coëfficiënt een belangrijke parameter in het model. Bij de keuze van de waarde van  $k$  is als uitgangspunt gehanteerd dat het geulensysteem in het estuarium zonder invloed van baggeren en storten stabiel is. Met voldoende historische gegevens over de morfologische ontwikkelingen kan men de waarde van  $k$  kalibreren door vooral te kijken naar de morfologische tijdschaal m.b.t. het kantelen van het geulensysteem (Volgens het model heeft de waarde van  $k$  grote invloed op de snelheid waarmee een uit balans gebracht geulensysteem terugkantelt).

De opzet van het model dat is gebruikt voor deze studie is uitgebreid beschreven in Tanczos et al. (2004). Hierbij kan nog worden opgemerkt dat de gebruikte schematisatie vrijwel gelijk is aan die van het ESTMORF model. De waterbeweging wordt aangestuurd door dezelfde randvoorwaarden als in het ESTMORF model, namelijk een gemiddeld springtij. Dit betekent dat de veranderingen per jaar volgens het SOBEK model groter zullen zijn dan in werkelijkheid (naar verwachting ongeveer 1,5 zo groot).

Het SOBEK model wordt in de huidige studie primair gebruikt voor de bepaling van veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem (beantwoording van onderzoeksvraag 2). Daarnaast worden de modelresultaten ook gebruikt voor het opstellen van een zandbalans om een vergelijking met de resultaten van het ESTMORF model en het DELFT3D model te kunnen maken.

Het SOBEK model kent de volgende beperkingen:

- SOBEK berekent een verandering van de oppervlakte van een dwarsprofiel. De verandering wordt verdeeld over de breedte proportioneel met de waterdiepte. In die zin wordt er geen onderscheid gemaakt tussen geulen en platen. Daarom kunnen de resultaten van het SOBEK model niet worden gebruikt voor het bepalen van de veranderingen van het intergetijdengebied.
- Doordat de netwerkstructuur van tevoren vastligt kan het ontstaan van een nieuwe geul en het verplaatsen van geulen, vooral de kortsluitgeulen, niet worden gesimuleerd door het model.
- Het model is niet uitvoerig gekalibreerd op basis van lange reeksen historische waarnemingen omdat in het kader van deze studie de benodigde tijd en middelen ontbraken. Hierdoor moeten absolute modelresultaten omzichtig worden geïnterpreteerd.

Om deze redenen moeten de resultaten van het SOBEK model voor de verschillende alternatieven met voorzichtigheid worden geïnterpreteerd.

### **3.4 Het 1-element model**

Met het zogenaamde 1-element model kan het onderhoudsbaggerwerk worden voorspeld bij het verdiepen en/of verbreden van de vaargeul. Hiervoor wordt een baggergebied als één element beschouwd waarvan wordt verondersteld dat het een evenwichtsdiepte heeft die onvoldoende is voor scheepvaart. Het baggeren leidt daardoor tot een 'overdiepte' en dus een 'zandhonger'. Als gevolg hiervan treedt er sedimentatie op in het gebied. Het benodigde onderhoudsbaggerwerk wordt bepaald door de sedimentatiesnelheid (in kubieke meters per jaar). Deze is afhankelijk van de grootte van het gebied, de 'overdiepte' ofwel

---

het verschil met de veronderstelde evenwichtsdiepte, de capaciteit van aanvoer van sediment uit de omgeving en de verticale uitwisselingssnelheid. Een meer gedetailleerde beschrijving van het model is gegeven in Wang et al. (2003).

De belangrijkste toepassing van het 1-element model bestaat uit het voorspellen van het benodigde onderhoudsbaggerwerk na een verdere verdieping van de vaargeul.

---

Het model heeft twee beperkingen:

- Bij voorspellingen wordt in het model verondersteld dat de evenwichtsdiepte van het gebied niet verandert, t.g.v. bijvoorbeeld verruiming van de vaargeul. Deze aanname gaat waarschijnlijk niet op als de nieuwe verruiming relatief erg groot is. Dit is in de huidige studie niet het geval omdat de nieuwe verdieping relatief klein is t.o.v. de nu te onderhouden overdiepte in de meeste baggergebieden.
- Het model neemt niet de invloed van het storten in de omgeving van een baggergebied mee. In principe kan het model die invloed wel meenemen via een aanpassing van de gehanteerde evenwichtsdiepte. Maar in de praktijk is het moeilijk om aan te geven hoe een bepaalde stortstrategie de evenwichtsdieptes van de verschillende baggergebieden beïnvloedt. Bij het vooronderzoek (Tanczos et al., 2004) is gebleken dat stortstrategie het onderhoudsbaggerwerk in individuele baggergebieden wel beïnvloedt maar dat de invloed op de totale hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk relatief klein is.

### **3.5 Het morfologisch DELFT3D model**

Het DELFT3D model is een zogenaamd procesmodel waarmee de over tijd en ruimte variërende waterbeweging (waterstand en snelheid in drie richtingen) en sedimenttransport in drie dimensies wordt berekend. Op basis van de veranderingen in het berekende sedimenttransport worden de bodemveranderingen over twee jaar bepaald, waarvan het eerste jaar inspelen is. Berekende bodemveranderingen over één jaar zijn kort in vergelijking tot de tijdschaal van de morfologische veranderingen (jaren tot decennia). Dit betekent dat de berekende veranderingen initiële bodemveranderingen. De berekeningen worden uitgevoerd voor een doortij-springtijcyclus en gegeven bathymetrie, waarmee dus de invloed van de diverse projecten en maatregelen bestudeerd kunnen worden. Als bodemligging worden de situatie van 2001 en 2010 gebruikt, waarbij de bodem 2010 afkomstig is uit het ESTMORF model (zie Bijlage C).

Het DELFT3D model is gebaseerd op het Scalwest model van Rijkswaterstaat en afdoende gekalibreerd voor wat betreft de dieptegemiddelde waterbeweging; voor wat betreft het sedimenttransport is geen kalibratie uitgevoerd. Het modeldomein strekt zich uit van zeewaarts van het mondingsgebied tot aan Schelle. Voor een uitgebreide beschrijving van de opzet van het DELFT3D-model zoals dat voor deze studie is gemaakt, zie Tanczos et al. (2004).

Het DELFT3D model wordt ingezet ten behoeve van:

- Het evalueren van de invloed van stortstrategie op het onderhoudsbaggerwerk op de drempels in de Westerschelde (oude strategie, nulalternatief en verbeterd, vraag 3c).
- Het berekenen van het onderhoudsbaggerwerk voor het verdiepingsalternatief 13.1m (vraag 3b).
- Het bepalen van veranderingen in de grootschalige residuele sedimenttransportpatronen (vraag 1 en 2)
- Het berekenen van indicatieve initiële veranderingen van de geulen (vraag 2a), het ondiepwatergebied (vraag 3) en het intergetijdengebied (vraag 4).

Het DELFT3D model dat in de huidige studie wordt gebruikt kent de volgende beperkingen:

- De korte simulatietijd.
- Het model is nog niet voldoende gekalibreerd.
- Baggeren en storten konden aan het begin van de studie nog niet volledig worden gesimuleerd. Tijdens de studie is het model uitgebreid met de functionaliteit

- 
- baggeren/storten. Daardoor zijn de berekeningen die in dit rapport worden gebruikt (het nulalternatief en twee verdiepingsalternatieven) niet met deze functionaliteit uitgevoerd.
- In het model wordt het zoutgehalte niet meegenomen. Dit betekent dat de daarmee samenhangende dichtheidsstroming niet wordt gemodelleerd.

Deze combinatie van beperkingen betekent dat de modelresultaten relatief ten opzichte van het nulalternatief beschouwd dienen te worden. Daarom zullen de DELFT3D resultaten voor het nulalternatief niet in Hoofdstuk 5 (nulalternatief) worden gepresenteerd, maar pas in Hoofdstuk 7 (verdiepingsalternatieven).

### 3.6 Onzekerheden

Om een beeld te krijgen van de onzekerheden worden de modeluitkomsten zo veel als mogelijk en zinvol onderling vergeleken en vergeleken met de historische referentie. Naast de eerder beschreven beperkingen (die onzekerheden met zich meebrengen), is er nog een aantal andere onzekerheden die in de navolgende alinea's kort worden besproken.

#### *Zeespiegelstijging*

Een specifieke bron van onzekerheid is de zeespiegelstijging en de toename van de getijslag. Deze zijn overigens alleen van belang voor de modellering met ESTMORF en SOBEK omdat die rekenen over een lange periode. Er wordt aangenomen dat de zeespiegelstijging en toename van de getijslag gelijk zijn aan waargenomen stijging sinds 1968, te weten 20 en 15 centimeter per eeuw, respectievelijk (Van Banning, 2003; Dillingh en Heinen, 1994).

Zeespiegelstijging en de toename van de getijslag met de huidige snelheid wordt in het ESTMORF model alleen op impliciete wijze gemodelleerd<sup>1</sup>. Hiermee wordt bedoeld dat de zeespiegelstijging niet expliciet via de zeewaartse randvoorwaarden wordt opgelegd. Dit heeft te maken hoe het ESTMORF-model in het verleden is gekalibreerd en wat er voor de S-M.E.R. voor de toekomst wordt aangenomen:

Het ESTMORF model is gekalibreerd op basis van de morfologische gegevens van Westerschelde en monding over de periode 1968-1998 (zie Wang en Van Helvert, 2001 voor compleet overzicht). Op de zeewaartse rand van het model wordt een morfologisch getij uit 1971, een gemiddeld springtij, voorgeschreven. De opgetreden verhoging van de zeespiegel en de toename van de getijslag, op de zeewaartse rand, zijn niet via de randvoorwaarden voorgeschreven. Deze zijn impliciet meegenomen doordat het model is afgeregeld op de opgetreden morfologische ontwikkelingen die het gevolg zijn geweest van natuurlijke morfologische en hydrodynamische processen en ingrepen. Zonder aanpassing van de zeewaartse randvoorwaarden worden de opgetreden zeespiegelstijging en de toename van de getijslag geëxtrapoleerd naar de toekomst. Een versnelling van de zeespiegelstijging op de zeewaartse rand van 20cm/eeuw naar bijvoorbeeld 60 cm/eeuw kan worden gerealiseerd door in de randvoorwaarde een zeespiegelstijging van 40cm/eeuw voor te schrijven (zie bijvoorbeeld Jeuken et al, 2002 en 2003).

---

<sup>1</sup> In het DELFT3D model en het SOBEK model kunnen deze processen niet worden gemodelleerd doordat met een 'opgerekt' getij (morfologische versnellingsfactor) wordt gewerkt. Dit is niet erg omdat op de korte tijdschaal van de Delft3D-berekeningen de zeespiegelstijging verwaarloosbaar is en zeespiegelstijging weinig invloed heeft op de stabiliteit van de geulen (Wang et al, 2002) die met het SOBEK model wordt geëvalueerd.



---

Voor de modellering met SOBEK wordt de zeespiegelstijging verwaarloosd. Er wordt aangenomen dat de extra onzekerheid die dit tot gevolg heeft verwaarloosbaar is t.o.v. van de al bestaande onzekerheden. Bovendien heeft zeespiegelstijging weinig invloed op de stabiliteit van het geulsysteem (Wang et al., 2002). Daarnaast worden de meeste modeluitkomsten van de uitpolderingsalternatieven en de verdiepingsalternatieven t.o.v. het nulalternatief bekeken (relatieve effectbepaling). Daarom heeft het verwaarlozen van de zeespiegelstijging weinig invloed op de uiteindelijke conclusies over de stabiliteit van het geulsysteem.

---

#### *Kalibratie ESTMORF*

De grootte van de uiteindelijke onzekerheden wordt voor een groot deel bepaald door de kalibratie. In het geval van de kalibratie van het ESTMORF model blijkt dat voor het mondingsgebied niet de juiste gegevens over haven- en vaargeulonderhoud zijn gebruikt. In vergelijking met bagger- en stortvolumina in het nulalternatief, zijn deze een factor drie tot vier groter. Dit betekent dat het mondingsgebied tijdens de kalibratieperiode 1968-1998 relatief meer uit evenwicht is gebracht door vaargeul- en havenonderhoud dan in het nulalternatief het geval is. Als gevolg hiervan treedt in de gebieden waar gebaggerd wordt veel sedimentatie op. In de stortgebieden is juist sprake van erosie. De berekende sedimentatie in het mondingsgebied door het ESTMORF model voor het nulalternatief zal hierdoor naar verwachting te groot zijn. Bij het gebruik en de interpretatie van de modelresultaten is hiermee rekening gehouden. In het verleden is gebleken dat wel of niet meenemen van het mondingsgebied in het model weinig invloed heeft op de modelresultaten voor de Westerschelde. Daarom wordt verwacht dat dit gebrek weinig consequenties heeft voor de modelresultaten in de Westerschelde.

#### *Randvoorwaarden*

In paragraaf 3.3 is bij het bespreken van de verschillende modellen al genoemd dat het SOBEK en het DELFT3D model rekenen met verschillende hydraulische randvoorwaarden. Het SOBEK-model maakt gebruik van een gemiddeld springtij, terwijl DELFT3D rekent met een doottij-springtij cyclus. Hierdoor zullen de jaarlijkse morfologische veranderingen bepaald door het SOBEK model groot zijn in vergelijking met die van DELFT3D. Omdat in werkelijkheid er ook sprake is van een doottij-springtij cyclus zal het SOBEK-model ook in vergelijking met gemeten bodemveranderingen veel uitgesprokener resultaten geven. Ook het ESTMORF model gebruikt een gemiddeld springtij als randvoorwaarde zoals in het SOBEK model. Dit was bij de ontwikkeling van het model bewust gekozen om het intergetijdengebied goed mee te kunnen nemen. De coëfficiënten (in de empirische relaties) in het model zijn hiervoor aangepast en daarom heeft het gebruiken van een gemiddeld springtij in ESTMORF geen negatieve invloed op de modelresultaten.

#### *Invloed van kortsluitgeulen*

Kortsluitgeulen kunnen invloed hebben op de zandhuishouding van macrocellen en de sedimentuitwisseling tussen macrocellen. Ook de ontwikkelingen van de intergetijdengebieden en de ondiepwatergebieden en de stabiliteit van de geulen in de macrocellen kunnen worden beïnvloed door het quasi-cyclisch gedrag van de kortsluitgeulen, waarbij kortsluitgeulen ontstaan, expanderen, migreren en verzanden op een tijdschaal van jaren tot meerdere decennia (zie bijv. Jeuken, 2000). Het gedrag van deze geulen en veranderingen in dit gedrag kunnen met de huidige onderzoeksmiddelen niet worden voorspeld. Dit brengt onzekerheden in de resultaten met zich mee die op dit moment nog niet te kwantificeren zijn.

### **3.7 Samenvatting**

Morfologische ontwikkelingen in het Schelde-estuarium spelen zich af op diverse tijd- en ruimteschalen. Er bestaat momenteel geen instrumentarium om alle morfologische ontwikkelingen op alle ruimte en tijdschalen te bepalen. Ook voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen voor de huidige studie kan niet worden volstaan met één instrument. Daarom wordt gebruik gemaakt van een aantal onderzoeksmiddelen, waaronder verschillende numerieke modellen, met ieder hun eigen toepassingsgebied. Tabel 3-1 geeft een overzicht van de onderzoeksvragen en de modellen die gebruikt

---

worden voor het beantwoorden van die vragen. In Tabel 3-2 wordt aangegeven welke modellen per alternatief worden gebruikt.

Hoewel state-of-the-art was er in deze studie voor de S-M.E.R. geen gelegenheid om het SOBEK model en het DELFT3D model uitvoerig te kalibreren, wat consequenties heeft voor de wijze waarop de modelresultaten geïnterpreteerd dienen te worden. De effecten van de uitpolderingsalternatieven en de verdiepingsalternatieven worden relatief ten opzichte van de referentiesituatie, het nulalternatief, beschouwd.

Hierdoor zullen eventuele systematische fouten in de invoer en de modeluitkomsten uitmiddelen, waardoor de fouten / onzekerheden in de relatieve effectvoorspelling kleiner zijn dan in de absolute effecten. Daarnaast worden waar mogelijk en zinvol de resultaten van verschillende modellen met elkaar vergeleken om meer inzicht te krijgen in de onzekerheden.

**Tabel 3-1 Overzicht van de onderzoeksvragen en de modellen die gebruikt worden om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Een vetgedrukte X geeft welk model primair gebruikt wordt voor het beantwoorden van de vraag. Een normaal gedrukte X betekent dat de resultaten van dat model worden vergeleken met het model dat primair wordt gebruikt voor het beantwoorden van de vraag. Als er haakjes om de X staan dan betekent dit dat er een zeker voorbehoud moet worden gemaakt. Het Cellenconcept wordt gebruikt om de waarnemingen en de modelresultaten op een hoog abstractieniveau te analyseren.**

Onderzoeksvraag	Onderzoeksmiddel			
	ESTMORF	SOBEK	DELFT3D	1-element
1. Hoe verandert de zandhuishouding?	<b>X</b>	X	X	
2. Hoe verandert de stabiliteit van de geulen in de macrocellen: a) Wat is de invloed van ingrepen op de ontwikkeling van de geulen b) Hoeveel onderhoudsbaggerwerk c) Waar kan er gestort worden	(X)  X	<b>X</b> <b>X</b> <b>X</b>  <b>X</b>	   X X	   <b>X</b>
3. Hoe verandert het areaal intergetijdengebied	<b>X</b>		(X)	
4. Hoe verandert het areaal ondiepwatergebied	<b>X</b>		(X)	

**Tabel 3-2 Inzet van modellen voor het beantwoorden van de vragen per alternatief (aangeduid als x). De effecten van 12.8 m verdiepingsalternatief worden bepaald op basis van interpolatie (i). De toepassing van het 1-element model wordt in het vooronderzoek beschreven (Tanczos et al., 2004). De resultaten worden in de verdiepingsalternatieven gebruikt.**

Alternatief	Onderzoeksmiddel			
	ESTMORF	SOBEK	DELFT3D	1-element
1. Nulalternatief	x	x		
2. Verdiepingsalternatieven: a. 13.1 m diepgang b. 12.8 m diepgang c. 12.5 m diepgang	 x i x	 x i x	 x i x	 x i x
3. Uitpolderingsalternatieven: a. Braakman b. Overige polders	 x x			

---

---

---

## 4 De huidige morfologische situatie in een historisch perspectief

### 4.1 Inleiding

Morfologie is de wetenschap die de veranderingen in de bodemligging en de geometrie van, in dit geval, het Schelde-estuarium bestudeert (morfos = vorm). Deze veranderingen zijn het gevolg van veranderingen en gradiënten in de sedimentbewegingen (sedimenttransporten) in het estuarium, welke op hun beurt worden veroorzaakt door de waterbeweging (getij-stromingen, rivierafvoer, bochteffecten, enz.). Het morfologische gedrag van een estuarium is niet eenvoudig te begrijpen en te voorspellen omdat de waterbeweging, het zandtransport en de bodemveranderingen op een complexe, niet-lineaire wijze elkaar beïnvloeden.

De voorspelde morfologische effecten voor het nulalternatief worden vergeleken met de huidige en historische morfologische situatie van het estuarium (paragraaf 1.3). Deze morfologische situatie wordt in dit hoofdstuk beschreven. Hierbij worden de onderzoeksvragen 1 t/m 4 beantwoord vanuit een historisch perspectief met behulp van de indicatoren zoals gedefinieerd in Hoofdstuk 2. De belangrijkste antwoorden op de vragen worden in paragraaf 4.8 samengevat en bediscussieerd in het licht van de instandhoudingdoelstelling.

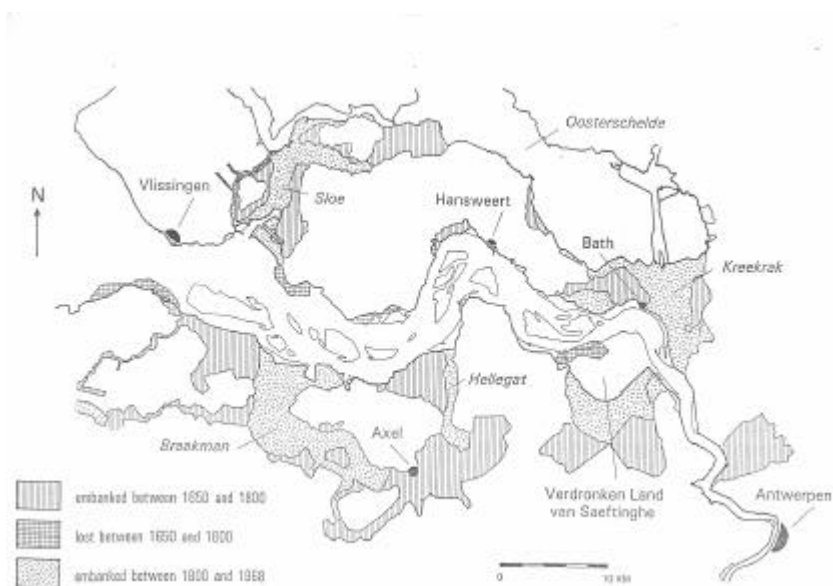
### 4.2 Het ontstaan van het estuarium en het meergeulensysteem

Het huidige Schelde estuarium is een relatief jong estuarium dat ongeveer 1000 jaar geleden is ontstaan door mariene inundatie van de riviervallei van de Schelde (Vos en Van Heeringen, 1997; Van den Berg et al, 1996; van der Spek, 1997).

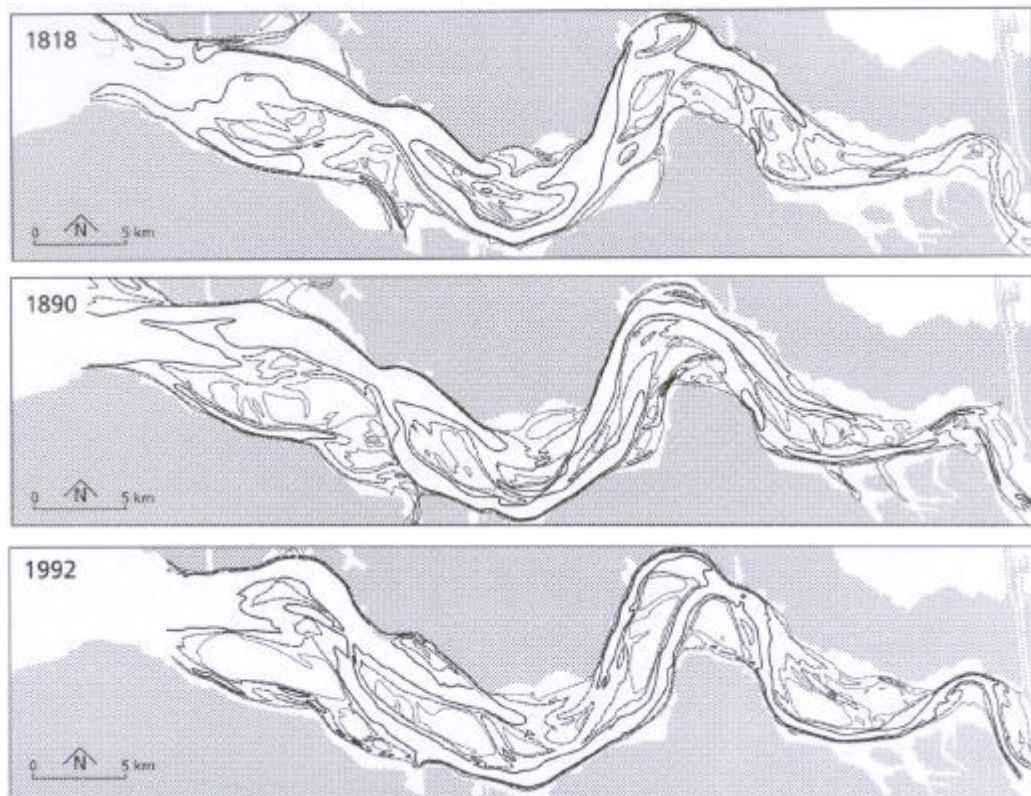
Tot het begin van onze jaartelling was er geen grote mariene invloed in het huidige mondingsgebied van het estuarium. Vanaf ca. 200 AD breidde de mariene invloed in dit gebied zich landwaarts uit, waarbij zich tussen 200 en 800 AD een groot geulensysteem ontwikkelde. Dit geulensysteem bestond uit drie geulen: een geul naar de Braakman nabij Terneuzen, een geul naar het Sloe bij Vlissingen en een geul naar het achterliggende gebied, de Honte. Tussen ca. 800 AD en 1100 AD ontstond er een verbinding tussen de Schelde rivier en de Honte, net ten noorden van Antwerpen. Vanaf ca. 1400 AD werd de omvang van het geulensysteem en het zeegat groter door stormvloed en inbraken in de veengebieden van o.a. centraal Zeeuws-Vlaanderen. Door deze expansie van het zeegat werd het Westerscheldegebied uiteindelijk de hoofdafvoer van de Schelde. Tijdens de Tachtigjarige oorlog (1568-1648) breidde het Westerschelde bekken zich verder uit als gevolg van militaire inundaties.

Tussen 1650 en 1968 zijn grote oppervlaktes intergetijdengebied langs de Westerschelde opgeslibd en vervolgens ingepolderd (Figuur 4-1). Deze afname van het kombergend oppervlak was grotendeels een natuurlijk proces (van der Spek, 1997): de intergetijdengebieden slibden op tot ruim boven het gemiddeld hoogwater, waarna ze met dijken omringd werden. Dat betekent dat het bergend vermogen onder gemiddelde getijomstandigheden van deze gebieden al voor de bedijking gering was. Het oppervlak van het bekken nam gedurende de periode 1650 tot 1968 met gemiddeld 44% af (Van der Spek, 1994, 1997). Tegelijkertijd werden de geulen van het estuarium bijna een factor twee dieper en ontwikkelde zich een regelmatig stelsel van geulen en platen, het huidige meergeulenstelsel (zie Figuur 4-2). Het verdwijnen van de hoge intergetijdengebieden langs de Westerschelde en het dieper worden van de geulen ging gepaard met een toename van de getijslag (Figuur 4-3) en een toename van de loopsnelheid van de getijgolf.

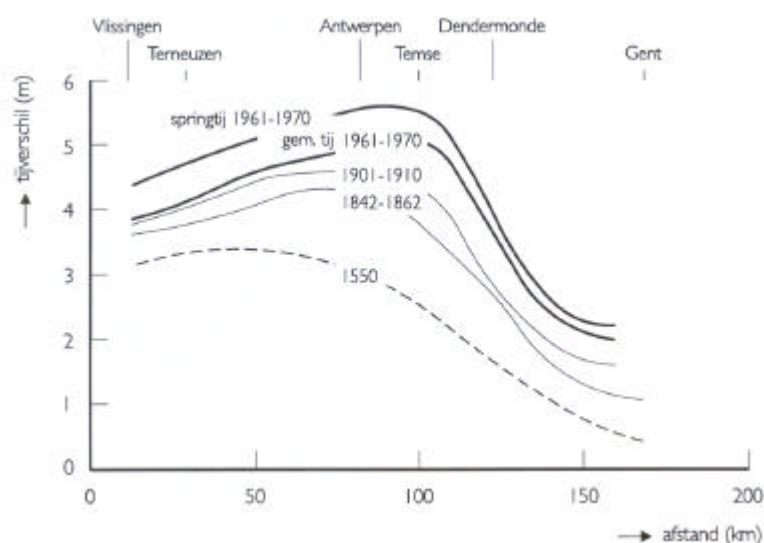
Deze verandering van de Westerschelde van een relatief ondiep, sterk vertakt getijbekken in 1650 naar het huidige gestroomlijnde en diepere estuarium, en de daarmee gepaard gaande veranderingen in de getijvoortplanting verklaren waarom het getijvolume op de zeewaartse rand van de Westerschelde sinds 1650 nauwelijks (orde 10%) is afgenomen ondanks de forse afname van het kombergende oppervlak van het estuarium (van der Spek, 1997).



**Figuur 4-1. De verandering van de Westerschelde van een ondiep vertakt getijbekken in 1650 naar het huidige gestroomlijnde en diepere estuarium (naar Van der Spek, 1994, 1995).**



**Figuur 4-2 Het ontstaan van het huidige meergeulenstelsel (Jeuken, 2000). Uit oude hydrografische kaarten sinds 1800 blijkt dat het huidige meergeulenstelsel in de Westerschelde tussen 1800 en 1905 is ontstaan. Dit proces kenmerkt zich door: het meanderen en het naar de oevers verplaatsen van de (gekromde) ebgeulen, het dieper en groter worden van de rechte vloedgeulen, een opbouw van de platen tussen de geulen, en het ontstaan van de zogenaamde kortsluitgeulen tussen de grote eb- en vloedgeulen. Nadat rond 1930 de ebgeulen de oevers hebben bereikt ligt de configuratie van de grote eb- en vloedgeulen op de meeste plaatsen vast.**



**Figuur 4-3 Veranderingen in de getijslag langs het estuarium sinds 1500 (naar van der Spek, 1994, 1995).**



---

Het mondingsgebied vormt een integraal onderdeel van het estuarium. De hoofdcontouren van het huidige mondingsgebied zijn waarschijnlijk ontstaan tijdens de periode 1400-1648 AD, waarin het geulsysteem van de Westerschelde/Honte snel uitbreidde onder invloed van stormvloed en militaire inundaties. Zeekaarten van eind 16e eeuw tonen een radiaal-georiënteerd geulpatroon dat zeewaarts uitwaaiert vanuit de keel van het estuarium. Het mondingsgebied wordt dan gekenmerkt door vijf geulen. Van Noord naar Zuid waren dit: Botkil, Deurloo, Spleet, Wielingen en Heijst-Knokke diep. De Wielingen is de periode 1400-1600 de belangrijkste geul voor de scheepvaart. In de daarop volgende periode 1600-1800 verliezen de Wielingen en de Spleet hun betekenis voor de scheepvaart door het ontstaan van drempels in het zeewaartse deel van hun loop. Tegelijkertijd ontwikkelt de meer noordelijk gelegen geul Deurloo zich tot diepste geul. Na 1800 nam de betekenis van de Deurloo als geul voor de scheepvaart weer af en werd de Wielingen weer de belangrijkste dan wel grootste geul in het mondingsgebied. Ook de betekenis van het Oostgat, onder de kust van Zuid-Walcheren, nam vanaf 1800 weer toe.

De faseverschillen tussen de getijstroming in het zeegat (de Westerschelde) en langs de kust bepalen het stroompatroon in buitendelta's en daarmee waarschijnlijk ook de morfologische ontwikkeling van de monding (Van Veen, 1936, Sha en van den Berg, 1993). Voor de Zeeuwse kust is er een faseverschil tussen het getij in het zeegat en het getij buitengaats (Van den Berg, 1987). Dit impliceert dat de maximale getijstroom in het zeegat ongeveer samenvalt met de stroomkentering op zee. Hierdoor ontstaat er een min of meer radiaal stromingspatroon over de buitendelta die zijn weerslag vindt in het geulpatroon van het mondingsgebied.

De veranderingen van het geulpatroon in het mondingsgebied sinds de 17<sup>de</sup> eeuw zouden kunnen samenhangen met veranderingen in het faseverschil tussen het getij in het zeegat en op zee (van der Spek, 1997): door de afname van het intergetijdengebied in de Westerschelde na de 17<sup>de</sup> eeuw zijn deze faseverschillen kleiner geworden. Hierdoor is de getijstroom in het zuidelijk deel van de monding, vooral door de Wielingen, waarschijnlijk toegenomen ten koste van de getijstroom door de geulen Deurloo en Spleet in het centrale deel van de monding. Dit zou kunnen verklaren waarom de Deurloo en de Spleet sindsdien in betekenis zijn afgenomen.

### **De invloed van de ondergrond en harde begrenzingen op de morfologische ontwikkelingen**

De morfologische ontwikkelingen in het estuarium worden beïnvloed door de opbouw van de ondergrond, oeverwerken en geulwandverdedigingen.

De invloed van de opbouw van de ondergrond zal zich het duidelijkst manifesteren in het geulgedrag. Hierbij moet gedacht worden aan het al dan niet belemmeren van de laterale verplaatsing van getijgeulen door moeilijk te eroderen lagen. Geulen snijden zich in de ondergrond in en/of eroderen hun buitenbochten. Daarbij lopen zij de kans om op oudere, erosiebestendige afzettingen te stuiten waardoor een verdere verdieping en/of verplaatsing (sterk) vertraagt kan worden (Van der Spek, 1997; Van der Spek in Winterwerp et al, 2001; Peters et al., 2001):

In de ondergrond van de Westerschelde en het mondingsgebied worden Tertiaire, Pleistocene en Oud-Holocene lagen aangetroffen. Hierop liggen o.a. de (sub)recente afzettingen van de geulen van het Honte bekken en de voormalige zijtakken van de Westerschelde. Vooral de Tertiaire maar ook de Pleistocene afzettingen hebben door

---

verkitting van de zanden en vooral sterke consolidatie van de kleien een matige tot (zeer) hoge erosiebestendigheid. Vooral de overgeconsolideerde Boomse Klei is in dit opzicht een belangrijke afzetting. Zo heeft de Pas van Terneuzen zich tussen de Braakman en de Platen van Hulst tot een maximum van ca. 7 m ingesneden in deze Boomse Klei. Ook de grote geul Wielingen in het mondingsgebied, snijdt ten noordwesten van Breskens, op de overgang naar de Rede van Vlissingen, de Boomse Klei aan. Dit betekent dat het diepste deel van de Wielingen hier vastgelegd is door de Boomse Klei, en dat een westwaartse uitbreiding van het diepste deel van de Wielingen sterk bemoeilijkt zal worden.

Ook een noordwaartse verplaatsing van het diepste deel van de Wielingen in de toekomst zal bemoeilijkt worden. Bij Borssele heeft de Honte zich meer dan 20 m ingesneden in de overwegend zandige afzettingen van de Formatie van Oosterhout. Ook meer recentere klei- en veenlagen en afzettingen, die bestaan uit een afwisseling van zand en klei op cm-schaal, welke een zelfde erosiebestendigheid vertonen als geconsolideerde kleilagen, aanzienlijk meer weerstand bieden dan zandige afzettingen. Veel van de slikken, in vooral het oostelijk deel liggen op veenlagen, waardoor de geul/slik overgangen weinig veranderen.

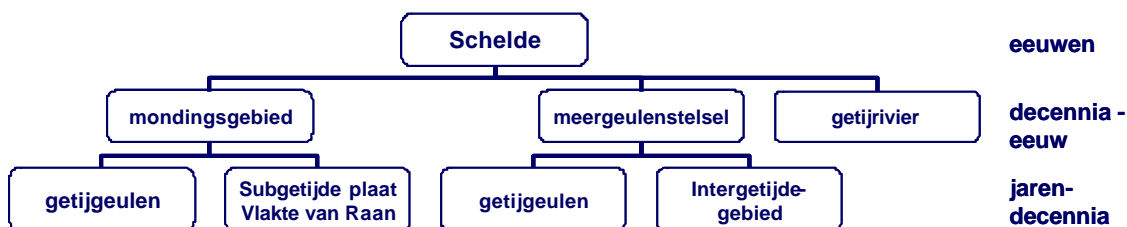
In de samenstelling van de ondergrond van de Westerschelde en de aangrenzende gebieden kunnen geen directe redenen gevonden worden voor het huidige bochtige verloop van het estuarium. De zogenaamde 'ophangpunten' van het estuarium lijken niet direct geologische bepaald te zijn. Het huidige verloop van het estuarium is eerder een overblijfsel van het door de Schelde rivier aangetapte, sterk vertakte getijdebekken. Ondanks dat vrijwel alle zijtakken van dit estuarium verland en vervolgens ingepolderd zijn, is het kronkelende verloop van het estuarium door, onder meer, de verdediging van de oevers, grotendeels bewaard gebleven.

De relatief recent aangelegde geulwandverdedigingen langs de vaargeul in vooral het oostelijk deel en het middendeel van de Westerschelde zullen een verdere laterale verplaatsing van de geul tegengaan. Daarnaast zijn er op diverse plaatsen langs de Westerschelde in het verleden (haven)hoofden en oeverwerken aangelegd die een invloed hebben op de belijning en locale diepte van de geulen. Nabij de grens wordt zijn in de zeventiger jaren twee leidammen tussen de eb- en vloedgeulen van twee macrocellen aangelegd (een macrocel op Nederlands grondgebied en een macrocel op Vlaams grondgebied).

### 4.3 Morfologische fenomenen en hun samenhang

#### 4.3.1 Morfologische fenomenen

De huidige morfologische situatie van het estuarium wordt gekenmerkt door een cascade van verschillende morfologische eenheden (Figuur 4-4). Ieder element in deze cascade wordt gekenmerkt door specifieke afmetingen, een ruimteschaal, en een tijdschaal waarop morfologische veranderingen van het element zich manifesteren.



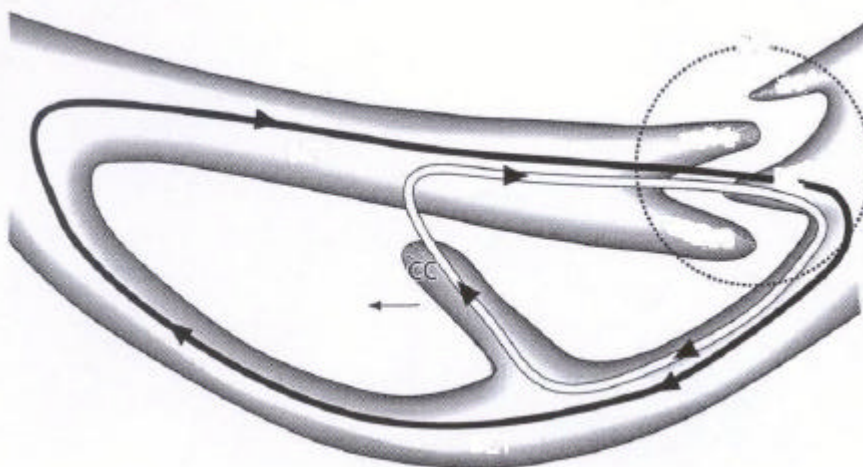
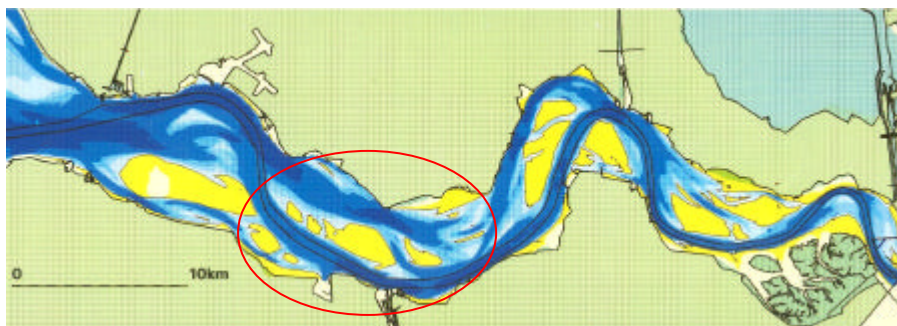
**Figuur 4-4 Cascade van morfologische eenheden in het estuarium**

---

Het Schelde estuarium is de grootste morfologische eenheid (zie Figuur 4-4). Deze eenheid is samengesteld uit drie kleinere eenheden: het mondingsgebied, het meergeulensysteem (inclusief de intergetijdengebieden) in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde tot aan het Deurganckdok en de meanderende getijrivier landwaarts van het Deurganckdok. Het mondingsgebied en het meergeulensysteem bestaan ook weer uit kleinere elementen, in essentie geulen en sub- en intergetijdgebieden en schorren (in geval van de Westerschelde en Zeeschelde).

Het meergeulensysteem in de Westerschelde bestaat uit een regelmatig patroon van zes zogenaamde bochtgroepen die elk worden gekenmerkt door een eigen gedrag (Jeuken, 2000, Figuur 4-5). Een bochtgroep is een samengestelde morfologische eenheid die bestaat uit een gekromde ebgeul met daarnaast een rechte vloedgeul. Deze geulen worden gescheiden door langgerekte sub- of intergetijdengebieden. Kleinere kortsluitgeulen vormen verbindingen tussen de grote eb- en vloedgeul. Tijdens de studie voor de Langetermijnvisie is dit systeem van geulen geschematiseerd als een ketting van zogenaamde macrocellen en mesocellen (Winterwerp et al, 2000; zie Figuur 4-5). De macrocellen worden gevormd door de grote eb –en vloedgeulen. De mesocellen bestaan veelal uit de kleinere kortsluitgeulen.

Iedere eb- en vloedgeul in de macro- en mesocellen wordt gekenmerkt door een drempel, een gebied waar de geul relatief ondiep is. De ebgeulen hebben een drempel aan de zeewaartse zijde van de geul (de geul ligt 'open' voor de eb, Van Veen, 1950). Vloedgeulen hebben een drempel aan de landwaartse zijde, waarbij deze ondiepe gebieden veelal doorsneden worden door kortsluitgeulen.

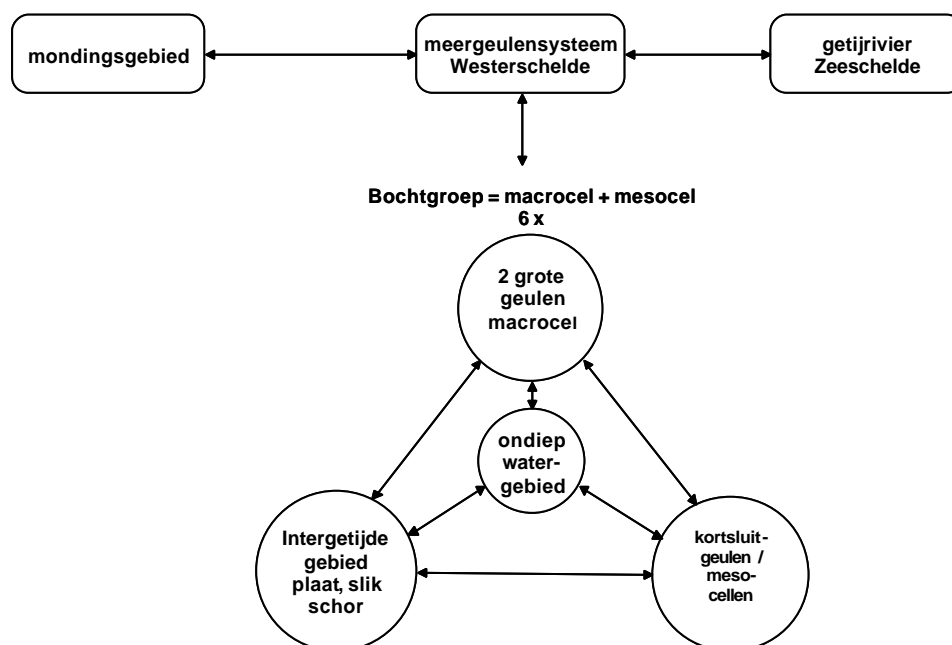




**Figuur 4-5 Het meergeulensysteem in de Westerschelde en de schematisatie in bochtgroepen (middelste figuur, Jeuken, 2000) en het systeem van macro- en mesocellen (naar Winterwerp et al, 2000, onderste figuur).**

#### 4.3.2 Samenhang in de morfologische ontwikkeling van het meergeulensysteem

De ontwikkelingen van de geulen in de macro- en mesocellen, de platen en het zogenaamde ondiepwatergebied hangen nauw met elkaar samen. Het karakter en de instandhouding van het huidige dynamische meergeulensysteem wordt in belangrijke mate bepaald door de aanwezigheid en de morfologische veranderingen van de grote eb- en vloedgeulen in de macrocellen (Figuur 4-6):



**Figuur 4-6 Samenhang tussen morfologische eenheden binnen het meergeulensysteem. Voor toelichting zie tekst.**

De aanwezigheid en de veranderingen van de langgerekte platen tussen de geulen hangt nauw samen met de morfologie en het gedrag van deze eb- en vloedgeulen. Zo zullen

---

erosie en 'uitbochten' van de geulen kunnen leiden tot een opbouw (ophoging) van de platen tussen de geulen.

---

Een voortgaande opbouw van de platen kan echter weer leiden tot veranderingen in de getijvoortplanting, de komberging en de getijvolumina. Deze zullen op hun beurt weer invloed kunnen hebben op de ontwikkeling van de geulen, vooral wanneer het getijvolume toe- of afneemt omdat dit gepaard zal gaan met een erosie of sedimentatie in de geulen.

De verschillen in lengte en diepte van de eb- en vloedgeul vormen een randvoorwaarde voor de aanwezigheid de kortsluitgeulen, de geulen in de mesocellen, omdat deze geometrische verschillen tussen eb- en vloedgeul resulteren in dwarsverhangen die de aandrijvende kracht vormen voor de waterbeweging in de kortsluitgeulen. Veranderingen in de morfologie van de grote eb- en vloedgeulen, door natuurlijke processen en menselijke ingrepen, kunnen dus van invloed zijn op de aanwezigheid en het gedrag van de kortsluitgeulen. Echter wanneer kortsluitgeulen aanwezig zijn kunnen zij de ontwikkeling van de grote geulen ook beïnvloeden (Jeuken, 2000). Een extreem voorbeeld hiervan is de bochtafsnijding in het midden deel van de Westerschelde (gebied 4, Figuur 4-7). Het van nature kantelen van de geulsystemen van de macrocellen in het westelijke en midden deel van de Westerschelde tussen 1955 en 1996 hangt sterk samen met het gedrag van de kortsluitgeulen (Jeuken, 2000 en Jeuken et al, 2003).

De kortsluitgeulen vormen een belangrijke bron van morfologische dynamiek in het estuarium door hun quasi-cylisch gedrag op een tijdschaal van jaren tot meerdere decennia, waarbij de geulen ontstaan, expanderen, migreren en verzanden. Vooral de migratie van de kortsluitgeulen zorgt voor een locale regeneratie van de platen, ondiep watergebieden en eventuele slikken die naast gebieden met kortsluitgeulen liggen (zoals het slik van Ellewoutsdijk). Vooral in het oostelijk en midden deel van de Westerschelde is de aanwezigheid en dynamiek van kortsluitgeulen sinds 1900 en 1951 afgenomen. Deze afname is een gevolg van overwegend natuurlijke processen waarbij het vaargeulonderhoud de ontwikkelingen zal hebben versterkt maar niet bepaald (Jeuken et al., 2003). Een praktische functie van de kortsluitgeulen is hun rol in het scheiden van de grote en kleine scheepvaart tussen hoofdgeul en nevengeul.

Voor de instandhouding van het dynamische meergeulenstelsel in de Westerschelde is het dus van belang dat de geometrische eigenschappen van de grote eb- en vloedgeulen niet wezenlijk veranderen. De horizontale configuratie van de grote eb- vloedgeulen ligt min of meer vast, doordat de geulen zijn ingeklemd tussen dijken en op verschillende plaatsen, waar dit niet het geval is, worden gefixeerd door geulwandverdedigingen. Dit betekent dat het vooral van belang is om na te gaan hoe de gemiddelde diepte van de geulen in het verleden en in de toekomst verandert onder invloed van natuurlijke processen en ingrepen. Voor wat betreft het kwalificeren van de invloed van ingrepen is vooral het storten van sediment belangrijk omdat langdurig storten van te grote hoeveelheden sediment kan leiden tot een degeneratie van macro en mesocellen (Winterwerp et al., 2000). Ook een sterke verdieping van de ebgeul, op de meeste plaatsen de vaargeul, ten opzichte van de vloedgeul kan als niet wenselijk worden beschouwd omdat dit op den duur zal kunnen leiden tot het verdwijnen van kortsluitgeulen en erosie van intergetijdengebieden.

In de navolgende paragrafen worden de historische ontwikkelingen van het meergeulenstelsel sinds 1955 beschreven aan de hand van de indicatoren in Tabel 2-1.

#### **4.4 De zandhuishouding**

Hoewel het meergeulenstelsel in de Westerschelde in beginsel door export van sediment (naar zee) is ontstaan, wordt de zandhuishouding gedurende tenminste de laatste eeuw

---

gedomineerd door een geringe import van sediment. Haring (1949, 1955) beschouwt de zandbalans van de Westerschelde over de perioden 1878-1931 en 1931-1952 op basis van een morfologische indeling waarbij de bochtgroep min of meer de basiseenheid vormt. Hij komt tot een gemiddelde jaarlijkse sedimentimport van ongeveer  $1.3 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  voor de periode 1878-1952. De import wordt bepaald door een sedimentatie in de intergetijdengebieden; de geulen onder gemiddeld laag water eroderen.

Recente zandbalansstudies beschouwen de ontwikkelingen in de zandhuishouding sinds 1955 op basis van gedetailleerde digitale dieptekaarten en ingreepgegevens in de Westerschelde (zie bijv. Uit den Bogaard, 1993 en de Jong 2000, Jeuken et al, 2003). Jeuken et al. (2003) hanteren een morfologische indeling waarbij de macrocel de basiseenheid is (zie Figuur 4-7). De belangrijkste tendensen met betrekking tot de grootschalige zandtransporten en erosie en sedimentatie kunnen als volgt worden samengevat (zie ook Jeuken et al, 2003a, Jeuken et al. 2003b):

De Westerschelde kent sinds 1955 perioden van zandimport en zandexport (Figuur 4-7). Tussen 1955 en 1970 treden grote variaties op in de zanduitwisseling tussen Westerschelde en monding, waarbij de grote import tussen 1965 en 1970 waarschijnlijk samen hangt met een sedimentatie in de grote ebgeulen tussen Vlissingen en Hansweert. Gedurende de periode 1970-1990 is er sprake van een duidelijke tendens van sediment import van orde  $2,5 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ . Na 1990 slaat deze tendens tot import om in een tendens waarbij de Westerschelde ongeveer  $1,5 \text{ Mm}^3$  zand per jaar exporteert. Het grootschalige patroon van sedimenttransporten in de Westerschelde wordt gekenmerkt door (Jeuken et al, 2003):

- Landwaarts gerichte transporten in oostelijk deel (gebieden 5-7) sinds 1960 van orde  $1 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  met uitschieters naar gemiddeld  $3 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  in de periode na 1980.
- Landwaarts gerichte transporten op de zeewaartse rand van gebied 4, van orde  $2 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  gedurende de periode 1960-1990. Sinds 1990 is er sprake van een kleine zeewaarts gerichte sedimentuitwisseling tussen gebied 3 en 4 (orde  $0.2 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ ).
- Landwaarts gerichte transporten op de zeewaartse rand van gebied 3, van orde  $1 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ , gedurende de periode 1960-1990. Na 1990 slaat dit landwaarts gerichte transport om in een zeewaarts gericht transport van een kleine  $1 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ .

Dus de omslag naar een sediment exporterend systeem sinds 1990 vindt zijn oorsprong in het westelijk en middendeel van de Westerschelde.

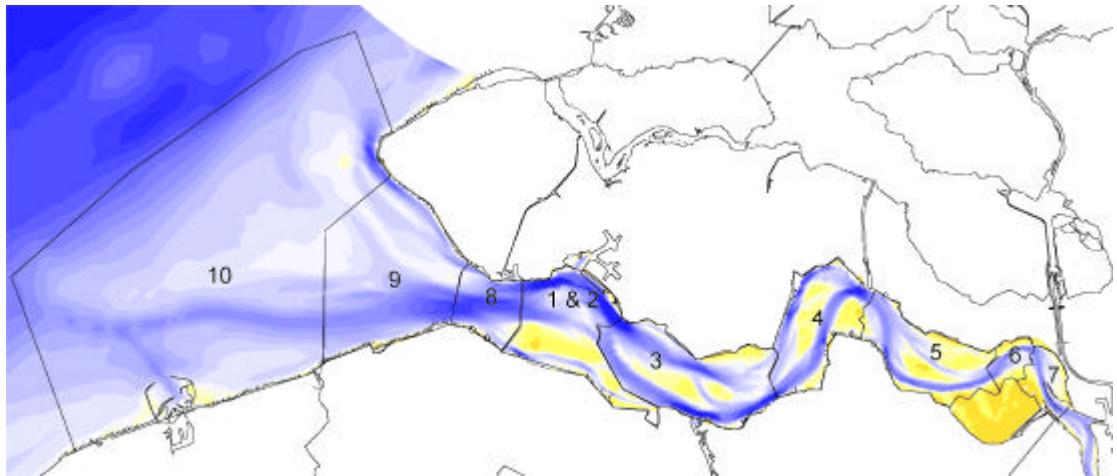
Kijken we naar de totale volumeverandering dan erodeert de Westerschelde als geheel met ongeveer  $1.7 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  als gevolg van zandwinning (Figuur 4-7). Zowel de tijdreeks van cumulatieve totale volumeverandering als de tijdreeks met de afgeleide import/export in de Westerschelde vertoont een cyclische variatie met een periode van ongeveer 18 jaar. Deze variatie wordt veroorzaakt door de 18,6 jarige cyclus in het getij (Jeuken et al., 2003b), waarbij het faseverschil tussen de hydrodynamische forcering en de morfologische respons ongeveer twee jaar is.

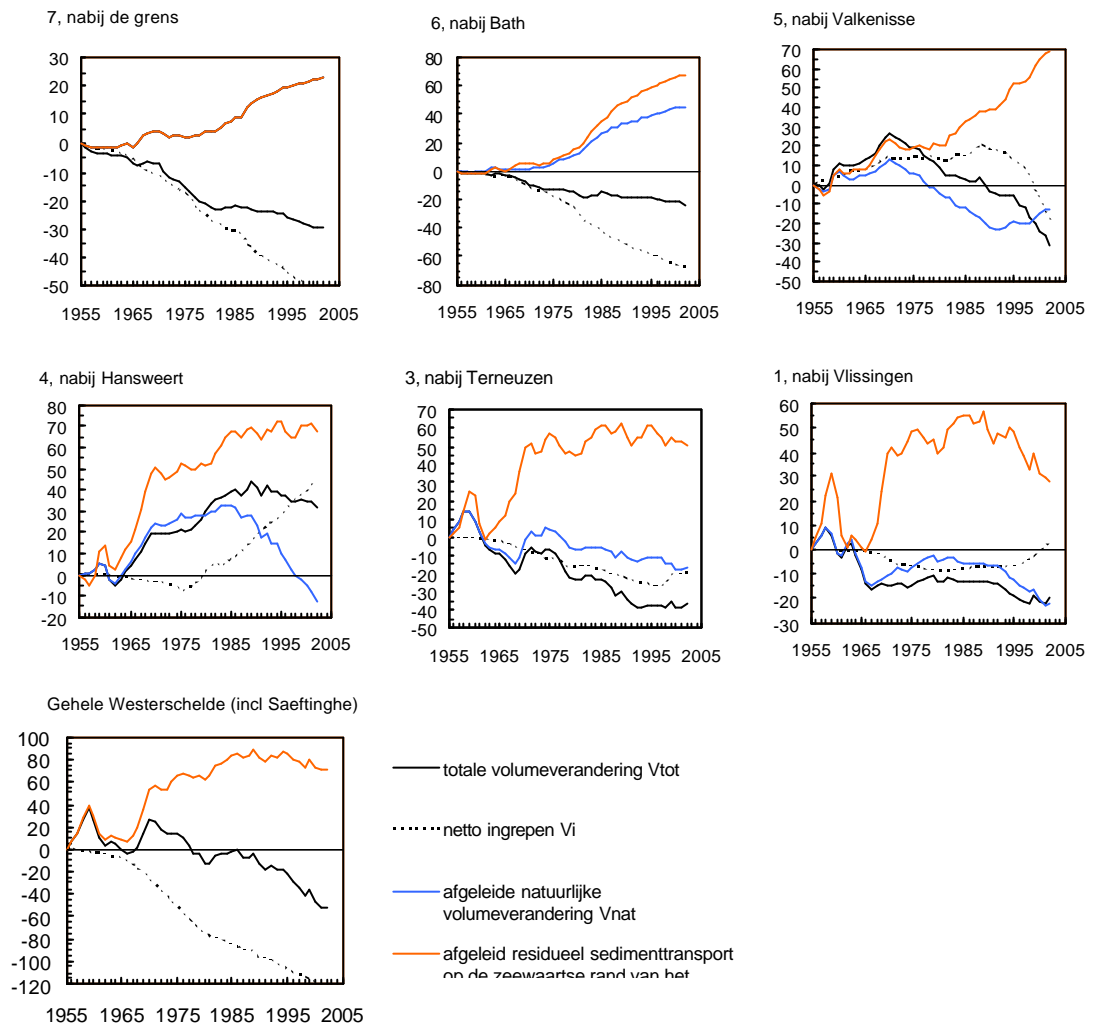
Beschouwen we de netto erosie en sedimentatie in de verschillende deelgebieden van de Westerschelde dan is er sprake van duidelijke ruimtelijke verschillen (zie ook Figuur 4-6):

- De lange-termijn ontwikkeling van de gebieden 5 t/m 7 in het oostelijk deel van de Westerschelde wordt gekenmerkt door een netto erosie, vooral sinds 1970. De erosie van de gebieden 6 en 7, nabij Bath, wordt veroorzaakt door netto baggeren, terwijl gebied 5 het Valkenisse-gebied vooral van 'nature' lijkt te eroderen



- 
- Het middengebied (4) nabij Hansweert wordt tot 1986 gekenmerkt door een natuurlijke sedimentatie. Tussen 1986 en 1990 slaat die sedimentatie tendens om in erosie.
  - De gebieden 1 en 3 in het westelijk deel van de Westerschelde eroderen min of meer van nature tot ongeveer 1996.
  - Het mesocellen gebied 2, gelegen tussen Zeeuws Vlaanderen en de Hoge platen, wordt gekenmerkt door een lange-termijn sedimentatie van ongeveer  $0.5 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ .
  - De cyclische variatie in de erosie van de Westerschelde ten gevolge van de 18,6-jarige cyclus komen ook terug in en sommige deelgebieden in vooral het westelijk deel van het estuarium.





**Figuur 4-7 Cumulatieve erosie en sedimentatie en afgeleide 'natuurlijke' transporten in de Westerschelde (in  $Mm^3$ ), gegevens ontleend aan Jeuken et al, 2003. Een dalende lijn betekent erosie, netto baggeren en export. Een stijgende lijn betekent sedimentatie, netto storten en import.**

---

## Interpretatie van veranderingen in de zandhuishouding

Bij de interpretatie van de zandbalans, en veranderingen in de zandbalans, spelen de volgende twee mechanismen een rol:

In de eerste plaats zijn veranderingen in het totale getijvolume van belang. Immers, het getijvolume bepaalt in sterke mate de grootte van het doorstroomoppervlak bij een dynamisch evenwicht,  $A_e$ . Dit doorstroomoppervlak neemt toe naarmate er meer water, een groter getijvolume, doorheen stroomt. Een toename van het getijvolume leidt tot een relatieve erosie omdat het doorstroomoppervlak  $A_e$  groter wordt bij een erodeerbare bodem. Een afname van het getijvolume leidt juist tot relatieve sedimentatie/verminderde erosie.

Het getijvolume kan veranderen door:

- Grootschalige (op de ruimteschaal van bochtgroepen) netto erosie of sedimentatie van de geulen, waardoor de getijvoortplanting (getijslag, loopsnelheid) verandert. Zo zal bijvoorbeeld een verdieping (erosie) van het estuarium gepaard gaan met een sterkere doordringing van het getij: de getijslag langs het estuarium neemt toe, waardoor de komberging en het getijvolume eveneens toenemen. De loopsnelheid van het getij neemt toe; het estuarium wordt efficiënter gevuld waardoor het getijvolume ook toeneemt. Een verondieping van (delen van) het estuarium zal juist leiden tot een afname van de getijdoordringing en een afname van het getijvolume.
- Erosie/sedimentatie van de intergetijdengebieden waardoor de getijvoortplanting en de komberging kunnen veranderen. Zo kan erosie van de intergetijdengebieden resulteren in een toename van de komberging en daarmee een toename van het getijvolume. Een opbouw van intergetijdengebieden leidt juist tot een afname van de komberging en het getijvolume.

Een verandering van het getijvolume door een verdieping of verondieping van de geulen en/of erosie of sedimentatie van intergetijdengebieden, kan door deze mechanismen leiden tot nieuwe morfologische veranderingen.

Een tweede aspect dat van belang is bij het interpreteren van de zandbalans is de mate waarin het dynamische evenwicht van deelgebieden wordt verstoord door ingrepen. Een toename van het getijvolume kan wel leiden tot een relatieve erosie. Echter als het doorstroomoppervlak  $A$  veel groter is dan het toegenomen evenwichtsdoorstroomoppervlak  $A_e$  omdat er netto wordt gebaggerd, zal er toch een netto sedimentatie optreden in het gebied doordat er een tekort aan zand is waardoor er netto zandtransport naar het gebied toe ontstaat. Als indicatie voor de mate waarin het evenwicht in deelgebieden wordt verstoord door ingrepen kan worden gekeken naar het teken van de totale en de afgeleide natuurlijke volumeverandering  $? V_{tot}$  en  $? V_{nat}$ . Wanneer de volumeveranderingen een tegengesteld teken hebben kunnen ingrepen als sturend worden gekwalificeerd (zie ook Hoofdstuk 2), en ontstaat er afhankelijk van het teken een sedimenttransport van ( $? V_{tot} > 0$ , sedimentatie) of naar ( $? V_{tot} < 0$ , erosie) het deelgebied.

Deze mechanismen spelen ook een rol bij de opgetreden veranderingen in de zandhuishouding:

- De afgelopen decennia zijn de getijslag en de loopsnelheid langs het estuarium met vijf tot tien procent toegenomen (Claessens en Meyvis, 1994). Dit zal gepaard zijn gegaan met een toename van het getijvolume van ongeveer tien procent.
- Het volume intergetijdengebied boven NAP-2m is toegenomen. Dit zal hebben geresulteerd in een kleine afname van het getijvolume.

---

Het netto effect van deze veranderingen zal een kleine, niet meetbare, toename van het getijvolume en het evenwichtsdoorstroomoppervlak zijn geweest. Deze zullen weer gepaard zijn gegaan met een relatieve erosie.

---

De grote landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel van de Westerschelde worden waarschijnlijk veroorzaakt doordat het doorstroomoppervlak groter is dan het evenwichtsdorstroomoppervlak als gevolg van het netto baggeren in dit deel van het estuarium. De precieze oorzaak van de omslag van sedimentimport naar een sediment export in het westelijk deel van de Westerschelde is niet bekend. Wellicht dat deze omslag verband houdt met het proces van bochtafsnijding in het middendeel van de Westerschelde dat omstreeks 1988 een (tijdelijk) nieuw evenwicht bereikte (zie ook Jeuken, 2000). Andere mogelijke factor die een rol kunnen spelen in deze verandering is de verplaatsing van de zandwinning van het westelijk deel van de Westerschelde naar het oostelijk deel in het begin van de jaren negentig en de verandering in de stortstrategie sinds de tweede verdieping. Dit dient echter verder te worden uitgezocht.

Tot slot komen de grootschalige morfologische veranderingen, zoals gekwantificeerd met behulp van de zandbalans, tot uitdrukking in veranderingen van de asymmetrie van het verticale getij (Wang et al., 2002, Winterwerp et al., in druk). In het oostelijk deel ging het dieper worden van de geulen en de uitbreiding van de intergetijdengebieden gepaard met een afname van de vloeddominante asymmetrie van het verticale getij. De sedimentatie in het middendeel ging gepaard met een afname van de ebdominante asymmetrie van het verticale getij bij Hansweert. Dit komt kwalitatief overeen met eerder onderzoek naar de relatie tussen morfologie en de asymmetrie van het verticale getij (zie bijvoorbeeld Boon en Byrne, 1981, Friedrichs et al, 1992).

#### **4.5 De stabiliteit van de geulen in de macro- en mesocellen**

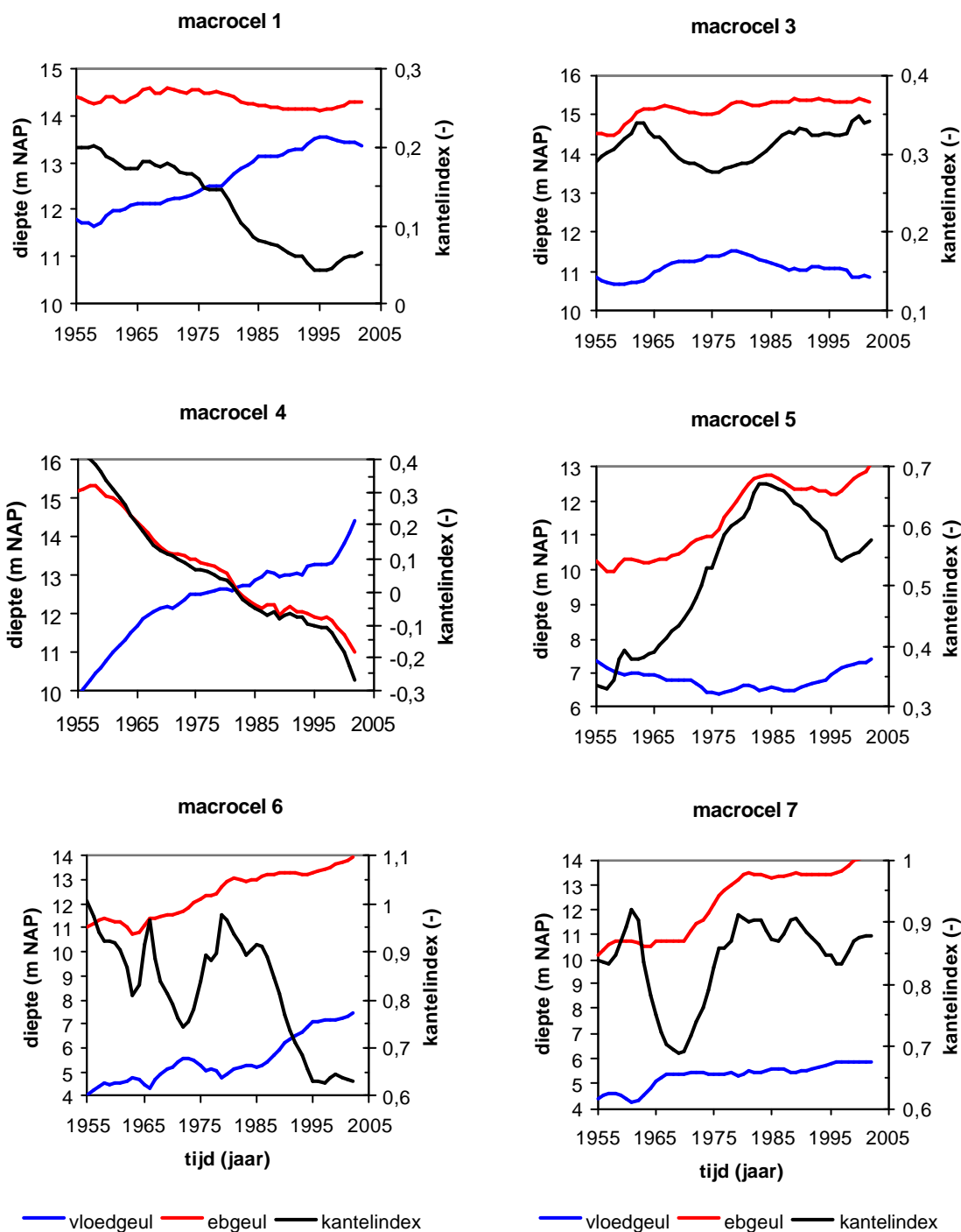
Zoals aangegeven in paragraaf 3.3 wordt het karakter en de stabiliteit van het huidige meergeulensysteem in belangrijke mate bepaald door de aanwezigheid en de morfologische veranderingen van de grote eb- en vloedgeulen in de macrocellen. Belangrijk hierbij zijn veranderingen in de gemiddelde diepte van de geulen en de mate waarin deze zijn beïnvloed door baggeren en storten. Jeuken et al. (2003) geven een uitgebreid overzicht van de historische ontwikkelingen van de geulen in de macrocellen gedurende de periode 1955-2002. De belangrijkste bevindingen met betrekking tot de stabiliteit van het geulsysteem kunnen als volgt worden samengevat (zie ook Figuur 4-8):

Macrocel 1, nabij Vlissingen. Tussen 1955 en 1996 kantelt dit geulsysteem richting de vloedgeul doordat de vloedgeul aanzienlijk verdiept (erodeert). Deze verdieping hangt samen met gedrag van kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul. De gemiddelde diepte in de ebgeul verandert weinig. Sinds de tweede verdieping kantelt het systeem richting de ebgeul (vaargeul). De vloedgeul verondiept waarschijnlijk als gevolg van netto storten (gemiddeld  $1.8 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  tussen 1997 en 2002). De ebgeul erodeert, mogelijk als reactie op de sedimentatie in de vloedgeul.

Macrocel 3, nabij Terneuzen. Dit geulsysteem kantelt in de loop der tijd in verschillende richtingen. Deze variatie vindt zijn oorsprong in de vloedgeul die tussen 1960 en 1978 verdiept en sinds 1978 verondiept. Deze diepteveranderingen manifesteren zich in het drempelgebied van de vloedgeul en hangen samen met het gedrag van kortsluitgeulen. De diepte in de ebgeul is in de loop der tijd iets toegenomen.

Macrocel 4, nabij Hansweert. Dit geulsysteem kantelt decennia lang richting vloedgeul (sinds 1981 de vaargeul). Deze kanteling hangt samen met de bochtafsnijding van de ebgeul in de jaren vijftig. Dit is een natuurlijk proces geweest. Halverwege de jaren tachtig

bereikte het geulsysteem een nieuw evenwicht waarbij de diepte van de eb- en vloedgeul weinig veranderde. Dit evenwicht is sinds de tweede verdieping verstoord. Grote netto stortingen in de ebgeul en tijdelijk verminderde netto stortingen in de vloedgeul hebben een nieuwe impuls aan het kantelingproces gegeven.



**Figuur 4-8** Verandering van de gemiddelde diepte van de geulen (in m NAP) en de kantelingindex. Een positieve waarde van de index betekent dat de ebgeul dieper is

---

***dan de vloedgeul. Een dalende lijn betekent dat de vloedgeul relatief meer verdiept (of minder verondiept) dan de ebgeul. Een stijgende lijn duidt juist op het tegenovergestelde (zie ook Hoofdstuk 2).***

---

Macrocel 5, het Valkenisse-gebied. De lange-termijn trend (sinds ten minste 1931) is een kanteling van het geulsysteem richting ebgeul waarbij de ebgeul verdiept en de vloedgeul ondieper wordt. Dit is in beginsel vooral een natuurlijk proces geweest. De invloed van het vaargeulonderhoud nam in de loop der tijd toe: tussen 1955 en 1985 kantelt het geulsysteem fors richting ebgeul (vaargeul). De ebgeul erodeert onder invloed van het verdiepen en onderhouden van de vaargeul (baggeren) en waarschijnlijk ook als gevolg van natuurlijke processen. De vloedgeul verondiept waarschijnlijk als gevolg van netto stortingen. Tussen 1985 en 1997 kantelt het systeem richting vloedgeul door een erosie van de vloedgeul en sedimentatie in de ebgeul. In deze periode ontstaan, na een periode van afwezigheid, nieuwe kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul. Sinds de tweede verdieping in 1997-1998 verdiept de ebgeul ten opzichte van de vloedgeul door netto baggeren in de ebgeul van gemiddeld  $5\text{Mm}^3/\text{jr}$  (aanleg, onderhoud en zandwinning samen gedurende de periode 1997-2002).

De geulsystemen in de macrocellen 6 en 7, nabij Bath, eroderen onder invloed van het langdurig netto baggeren (gemiddeld  $1.5\text{Mm}^3/\text{jr}$  per cel gedurende de periode 1955-2002). Zowel de gemiddelde diepte van de ebgeul als vloedgeul nemen in de loop der tijd toe. De kantelindex van macrocel 6 varieert vrij sterk in de tijd waarschijnlijk als gevolg van stortingen in de vloedgeul. In macrocel 7 blijft de verhouding tussen de diepte van de ebgeul en de vloedgeul min of meer constant, op een grote fluctuatie rond 1970 na. Deze fluctuatie hangt waarschijnlijk samen met de aanleg van de leidam rond 1970.

Samenvattend kan het volgende worden geconcludeerd met betrekking tot de stabiliteit van het geulsysteem:

- De stabiliteit van het geulsysteem verandert in de loop der tijd door natuurlijke processen en door baggeren en storten.
- De veranderingen in de stabiliteit van de macrocellen in het westelijk deel (1 en 3) en midden deel van de Westerschelde tussen 1955 en 1996 zijn in belangrijke mate bepaald door natuurlijke morfologische processen in vooral de vloedgeulen (kortsluitgeulen).
- De natuurlijke langtermijn veranderingen in de stabiliteit van de macrocellen in het oostelijk zijn sinds 1970 in belangrijke mate beïnvloed door baggeren en storten ten behoeve van het vaargeulonderhoud.
- De tweede verdieping is gepaard gegaan met veranderingen in de stabiliteit van de macrocellen 1, 4 en 5 (kanteling richting vaargeul). Vooral de recente kanteling van macrocel 4 geeft reden tot zorg wanneer het gaat om het behouden van het tweegeulensysteem.

#### **4.6 De ontwikkeling van de intergetijdengebieden**

Voor het schetsen van de ontwikkeling van de intergetijdengebieden wordt gebruik gemaakt van de analyseresultaten van Stickvoort et al., 2003 en Peters et al., 2003. Deze resultaten hebben betrekking op de veranderingen in het areaal plaat in het oostelijke, midden en westelijk deel (zie Figuur 4-9). Van het areaal slikken zijn slechts vier waarnemingen beschikbaar voor de periode 1959-2001, waarvan drie metingen sinds 1988. Voor een beschrijving van deze areaalveranderingen zie Stickvoort et al., 2003.

De ontwikkeling van het areaal platen in de Westerschelde als geheel wordt gekenmerkt door een toename van ongeveer 700 ha in de periode 1955-1970 (Figuur 4-9). In de periode na 1975 is er een tendens tot geringe afname. Deze tendens wordt gekenmerkt



---

door fluctuaties met een periode van ongeveer 18 jaar die mogelijk samen hangen met de 18,6 jarige cyclus in het getij.

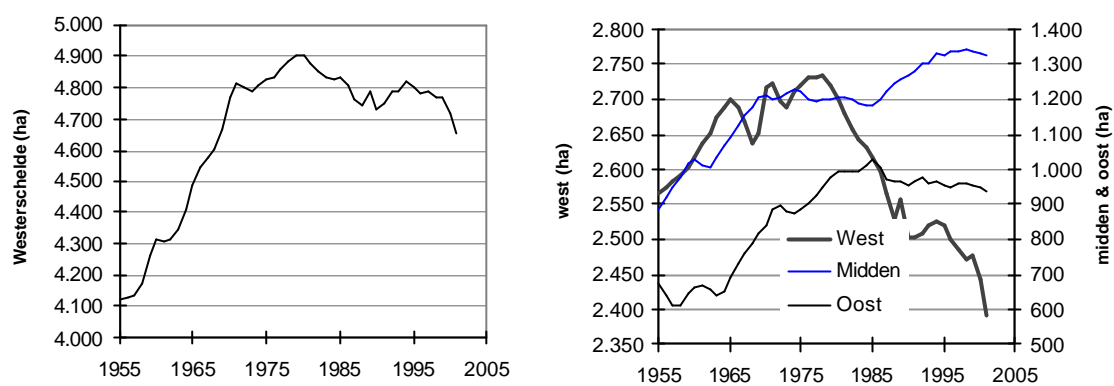
De toename van areaal platen manifesteert zich in de drie deelgebieden west, midden en oost, zij het wat meer gefaseerd in de tijd: in het westen neemt het areaal toe in de periode 1955-1965, in het midden deel gedurende de periode 1955-1970 en in het oostelijk deel gedurende de periode 1965-1980. De toename van het areaal plaat hangt in alle gebieden samen met veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem in de macrocellen (kanteling) en / of het gedrag van de kortsluitgeulen:

- In het westelijk deel gaat het om het van nature degenereren van een grote kortsluitgeul in de bochtgroep bij Terneuzen (macrocel 3) en het ontstaan van een nieuw patroon van kortsluitgeulen in de drempel van de vloedgeul, waardoor de platen konden opbouwen (Jeuken, 2000).
- De toename in het middendeel hangt vermoedelijk samen met het ontstaan van de bochtafsnijding van de ebgeul en de daarmee gepaard gaande kanteling van het geulsysteem en het verzanden van kortsluitgeultjes door de platen.
- De toename van het areaal platen in het oostelijk deel wordt vooral bepaald door de ontwikkelingen in de bochtgroep van Valkenisse-gebied (macrocel 5). Het systeem van de grote eb- en vloedgeul kantelt hier sinds tenminste 1931 richting ebgeul (de ebgeul wordt dieper ten opzichte van de vloedgeul, Jeuken, 2000; Jeuken et al, 2003). Dit is tot 1970 grotendeels een natuurlijk proces geweest, waarbij de bochtafsnijding in het middendeel waarschijnlijk ook een belangrijke rol heeft gespeeld<sup>2</sup>. Als gevolg van deze kanteling zijn de dwarsverhangen tussen eb- en vloedgeul afgenomen (zie Hoofdstuk 2) wat verklaart waarom de activiteit van kortsluitgeulen sinds 1900 geleidelijk is afgenomen (Jeuken, 2000). Door deze afgenomen activiteit van kortsluitgeulen heeft de plaatopbouw in het Valkenisse-gebied een impuls gekregen die na de eerste verdieping vermoedelijk versterkt is door het vaargeulonderhoud, en dan vooral het storten in de vloedgeul.

De afname van het areaal platen in de Westerschelde na 1975 manifesteert zich in het westelijk deel van de Westerschelde. Deze afname hangt wederom samen met een natuurlijke verandering in het gedrag van de kortsluitgeulen: de migratie, en uiteindelijke degeneratie van een patroon van kortsluitgeulen en het ontstaan van een nieuw patroon van kortsluitgeulen in de bochtgroep van Terneuzen (gebied 3 in Figuur 4-6) ging gepaard met de erosie / omwerking van stukken plaat (Jeuken, 2000).

---

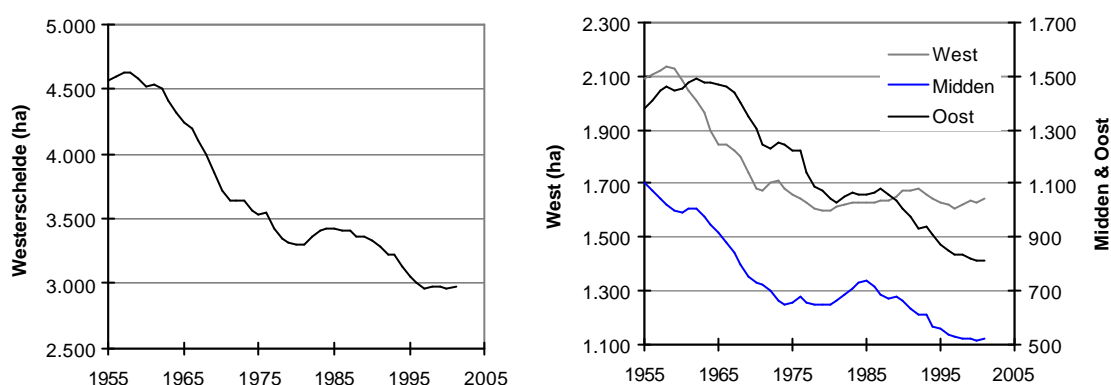
<sup>2</sup> De aanstroming van de eb- en vloedgeul in het Valkenissegebied tijdens vloed is waarschijnlijk veranderd waarbij de vloedstroom meer richting ebgeul werd gestuurd. De kloksgewijze rotatie en zuidwestelijke verplaatsing van de vloedgeul Schaar van Waarde / Valkenisse wijst ook op een dergelijke verandering in aanstroming.



**Figuur 4-9 Veranderingen in het areaal plaat (in ha) in de Westerschelde het westelijk, midden en oostelijk deel (gegevens ontleend aan Stickvoort et al, 2003)**

#### 4.7 De ontwikkeling van de ondiepwatergebieden

Stickvoort et al. (2003) presenteren de ontwikkelingen van het areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde volgens de definitie in Figuur 2-2. Volgens deze historische waarnemingen (Figuur 4-10) neemt het areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde als geheel fors (35%) af tussen 1955 en 2002. De afname is het sterkst gedurende de periode 1960-1980. Na 1980 wordt de afname kleiner. Kijken we naar deze veranderingen in het oostelijke, midden en westelijk deel van de Westerschelde dan is er sprake van verschillen in de periode waarin de afname zich manifesteert. In het westen neemt het areaal vooral af tussen 1960 en 1975. In het midden gebied neemt het areaal af tot 1975 en na 1985. In oostelijk deel neemt het areaal ondiepwatergebied sinds 1965 af.

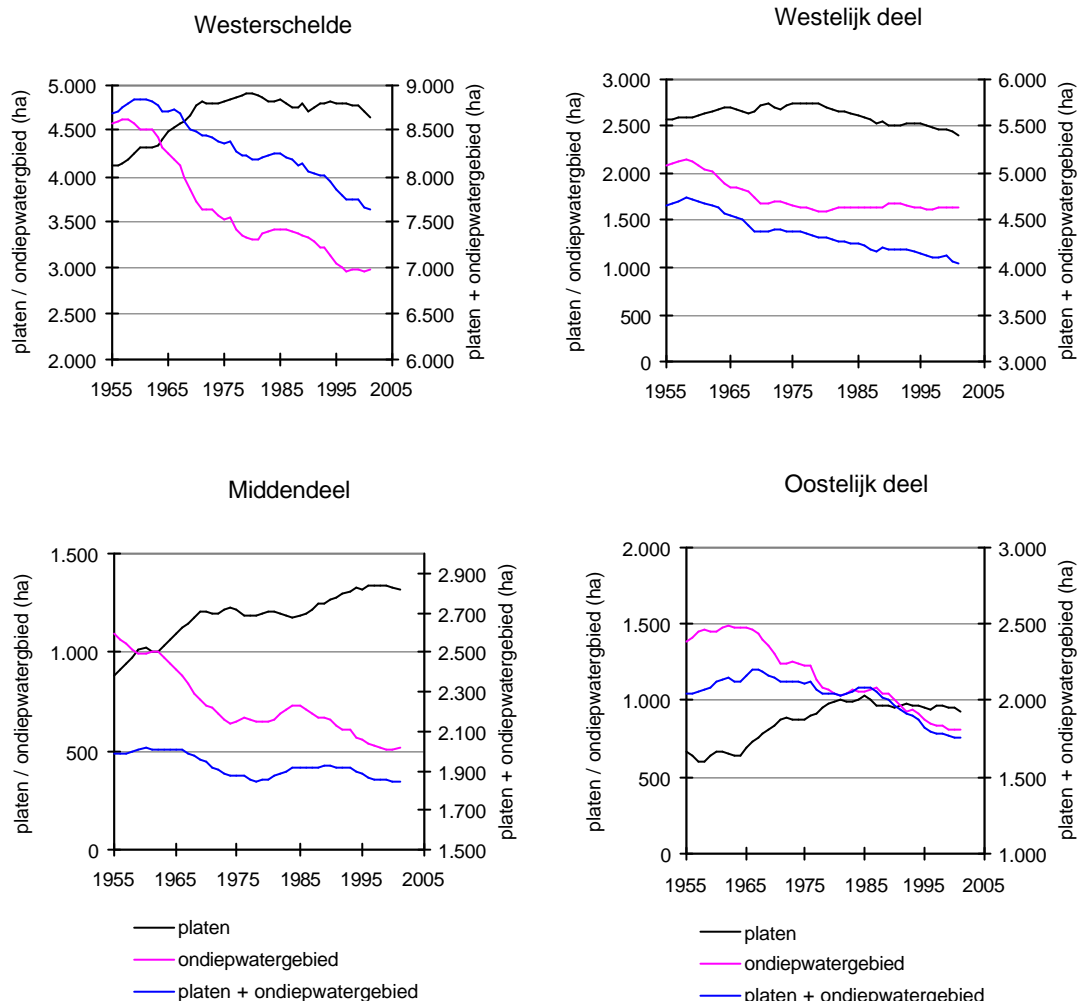


**Figuur 4-10 Veranderingen in het areaal ondiepwatergebied (in ha) in het westelijk, midden en oostelijk deel (gegevens ontleend aan Stickvoort et al., 2003)**

De precieze oorzaken van de afname van het areaal ondiepwatergebied, ook wel aangeduid als een versteiling van het plaat-geul reliëf, zijn niet goed bekend. Voor het oostelijk deel wordt de waargenomen afname van het areaal ondiepwatergebied toegeschreven aan het verdwijnen van kortsluitgeulen en het uitbreiden van het areaal intergetijdengebied (Vroon et al, 1997). Om een inzicht te krijgen in hoeverre en wanneer ondiepwatergebied is omgezet in platen is in Figuur 4-11 per deelgebied het areaal plaat, ondiepwatergebied en totale areaal plaat plus ondiepwatergebied weergegeven. Hieruit kan het volgende worden waargenomen:

- Voor de Westerschelde als geheel is een deel van het ondiepwatergebied veranderd in plaatgebieden (vooral tussen 1955 en 1965). Sinds 1965 is de afname van het areaal ondiepwatergebied vooral het gevolg van een toename van het areaal geul dat dieper is dan 5 m.
- In het westelijk deel hangt de afname van areaal ondiepwatergebied tussen 1955 en 1980 vooral samen met een uitbreiding van het areaal geul dieper dan 5m (erosie van de geulen).
- In het middendeel neemt het areaal plaat toe ten koste van het areaal ondiepwatergebied gedurende de perioden 1955-1966 en 1984-1995. De afname van het areaal ondiepwatergebied in tussen 1966 en 1975 en sinds 1995 wordt vooral veroorzaakt door een erosie van de vloedgeul.
- In het oostelijk deel wordt tussen 1955 en 1980 veel ondiepwatergebied omgezet in intergetijdengebied. De afname van het areaal ondiepwatergebied sinds eind jaren

tachtig hangt samen met een toename van het areaal geul dat dieper is dan 5m (erosie van de geulen).



**Figuur 4-11 Verandering van het areaal plaat, ondiepwatergebied en totale areaal plaat+ondiepwatergebied in de Westerschelde, het westelijk deel, het middendeel en het oostelijk deel.**

#### 4.8 Discussie en conclusies

De historische referentie laat zien dat het meergeulenstelsel een morfologisch dynamisch systeem is dat op een tijdschaal van twee eeuwen een tendens van ontwikkelingen kent. Het geulstelsel is dieper geworden en het volume platen tussen de geulen (sediment) is toegenomen, het areaal ondiepwatergebied is afgenomen; het plaat-geul reliëf versteilt. Daarnaast is er sprake geweest van kantelingen van het geulstelsel, waarbij de ene geul duidelijk dieper/groter wordt dan de andere geul. Deze tendensen van kantelen van het geulstelsel op lange termijn (decennia-eeuw) zijn in beginsel vooral een natuurlijk proces geweest waarbij het vaargeulonderhoud deze ontwikkelingen in de loop der tijd is gaan versterken. Het is de vraag of dit geprononceerde kantelingproces zich in zeewaartse richting gaat uitbreiden, waardoor het karakter van meergeulensysteem verder verandert.

---

---

---

De ontwikkelingstendensen van het meergeulensysteem gedurende de afgelopen decennia, i.e. de antwoorden op de onderzoeksvragen 1 tot en met 4 kunnen, kunnen als volgt worden samengevat:

1. De zandhuishouding van het meergeulensysteem wordt sinds ongeveer 1970 gekenmerkt door een monotone erosie. Vooral het oostelijk deel verruimt, als gevolg van netto baggeren. Tot begin jaren negentig importeerde het systeem circa  $1 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  (vanaf de monding). Sinds 1990 exporteert het westelijk deel van het meergeulensysteem sediment naar zee. Een tweede kenmerkend aspect is het grote landwaarts gerichte sedimenttransport naar het oostelijk deel (zie Figuur 4-7).
2. De stabiliteit van het geulsysteem verandert in de loop der tijd als gevolg van natuurlijke processen en ingrepen. Vooral in het oostelijk deel en het middendeel (zie Figuur 2-1 en Figuur 4-8) zijn grote veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem opgetreden. De natuurlijke kanteling in het middengebied heeft sinds de tweede verdieping een forse nieuwe impuls gekregen door wijzigingen in de stortstrategie.
3. Het areaal platen neemt sinds 1975 enigszins af, waarbij grote ruimtelijke variaties optreden (zie Figuur 4-9).
4. Het areaal ondiepwatergebied neemt af (Figuur 4-10). Een deel van het ondiepwatergebied is veranderd in platen en een deel van de afname wordt veroorzaakt door een uitbreiding van het areaal geul dieper dan 5 m.

Een degeneratie van het meergeulensysteem, waarbij het huidige twee-geulensysteem verandert in een een-geulsysteem, speelt zich waarschijnlijk af op een tijdschaal die beduidend groter is dan de tijdschaal van 30 jaar die in deze studie wordt beschouwd. Daarom zal voor de verschillende te onderzoeken alternatieven, naast en op basis van de antwoorden op de onderzoeksvragen 1 t/m 4, worden nagegaan of en hoe het huidige morfologische karakter van het meergeulensysteem verandert.

Het huidige morfologische karakter van het meergeulensysteem wordt hier als volgt getypeerd:

- Het meergeulensysteem in het oostelijk deel wordt gekenmerkt door ebgeulen (vaargeul) die beduidend groter en dieper zijn dan de vloedgeulen. De kantelindex van deze geulsystemen varieert ongeveer tussen de 0.3 en 1.1. In gebied 5 worden de eb- en vloedgeulen van elkaar gescheiden door platen en verbonden door kleine kortsluitgeultjes in het drempelgebied van de vloedgeul.
- Het middendeel bestaat uit twee grote geulen waarbij de vloedgeul (vaargeul) beduidend dieper is dan de ebgeul. De geulen worden gescheiden door platen.
- In het westelijk deel wordt gebied 3 gekenmerkt door een grote ebgeul en een grote vloedgeul (gelijkwaardige geulen) waarbij de ebgeul gemiddeld ongeveer 30% dieper is dan de vloedgeul. De stabiliteit van het geulsysteem verandert weinig in vergelijking tot het oostelijk en middendeel. De eb- en vloedgeul worden gescheiden door platen en verbonden door kortsluitgeulen die de platen doorsnijden.
- Gebied 1 in het westelijk deel, ter hoogte van Vlissingen, bestaat eveneens uit twee gelijkwaardige geulen, waarvan de stabiliteit weinig verandert in vergelijking tot het oostelijk en middendeel. In het drempelgebied van de vloedgeul komen migrerende kortsluitgeulen voor.

---

---

---

## 5 Morfologische ontwikkelingen in het nulalternatief

### 5.1 Inleiding

Het morfologisch onderzoek moet antwoord geven op de vraag of de randvoorwaarden voor de instandhouding van het meergeulensysteem bij verschillende maatregelen en projecten gewaarborgd zijn. Deze randvoorwaarden zijn vertaald naar de onderzoeksvragen 1 t/m 4 (Hoofdstuk 1):

1. Hoe ontwikkelt de zandhuishouding van het meergeulensysteem zich?
2. Hoe verandert de stabiliteit van het systeem van hoofd- en nevengeulen?
3. Op welke wijze verandert het intergetijdengebied, het areaal in het bijzonder?
4. Op welke wijze verandert het areaal ondiepwatergebied?

In dit hoofdstuk worden deze vragen beantwoord voor het nulalternatief, waarin het huidige beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning wordt voortgezet. Hierbij wordt aan de hand van de gedefinieerde indicatoren (Hoofdstuk 2) nagegaan of de ontwikkelingstendensen uit het verleden (Hoofdstuk 4) zich in de toekomst voorzetten, versterken of juist verzwakken of veranderen.

De toekomstige ontwikkelingen volgens het nulalternatief worden gesimuleerd met zowel het ESTMORF- als het SOBEK-model (zie Hoofdstuk 3). Per vraag worden eerst de resultaten van het model gepresenteerd dat primair bedoeld is om die vraag te beantwoorden (zie Tabel 3-1). Vervolgens worden voor de vragen 1 en 2 de voorspellingen van beide modellen vergeleken op consistenties en verschillen om zo een kwalitatief beeld te krijgen van de onzekerheden in de voorspellingen. Daarna volgt een vergelijking met de ontwikkelingstendensen uit het verleden.

Naast een berekening met het vaargeulonderhoud en zandwinning volgens het nulalternatief (zie paragraaf 5.2) is met beide modellen ook een berekening zonder vaargeulonderhoud en zandwinning uitgevoerd. De resultaten van deze berekening geeft inzicht in de invloed van het vaargeulonderhoud en de zandwinning op de ontwikkelingstendensen, als aanvulling op de methode zoals beschreven in Hoofdstuk 2.

### 5.2 Het nulalternatief

Zoals gezegd in de inleiding wordt in het nulalternatief het huidige beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning voortgezet. In overleg met ProSes, AWZ en Directie Zeeland, is dit gedefinieerd in de verdeling van de jaarlijkse bagger-, stort- en zandwinhoeveelheden zoals weergegeven in Tabel 5-1.



**Tabel 5-1 Jaarlijks vaargeulonderhoud en zandwinning in het nulalternatief. Voor de geografisch ligging van de locaties, zie nummers in Figuur 5-1. Voor ieder locatie wordt ook aangegeven in welke macrocel en in welke geul van de macrocel de ingreeplocatie ligt (e= ebgeul, v=vloedgeul) In de Everingen en de Schaar van Waarde wordt gestort en zand gewonnen. Voor een overzicht van ingrepen per geul en per macrocel zie Bijlage D.**

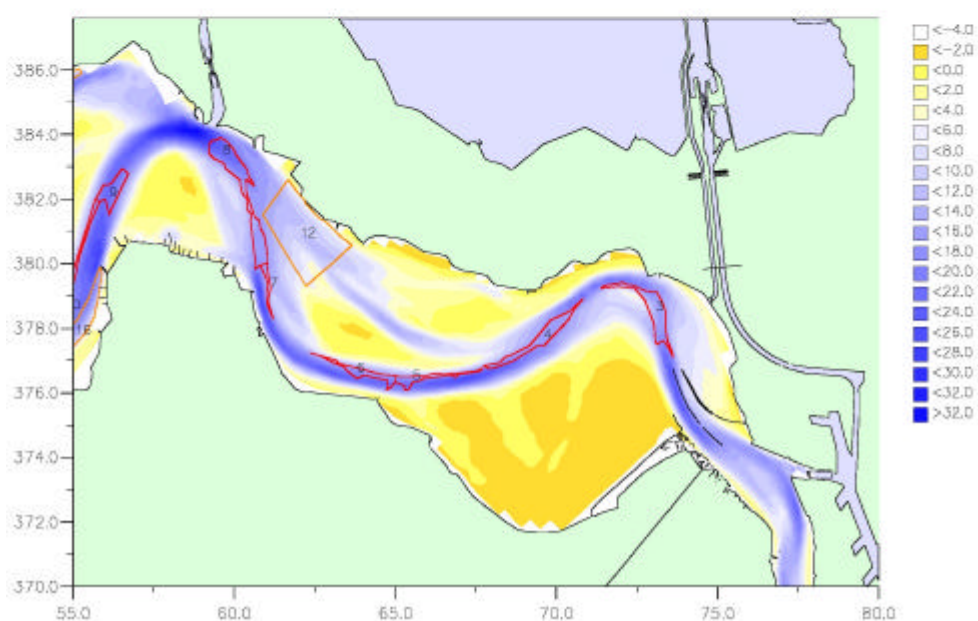
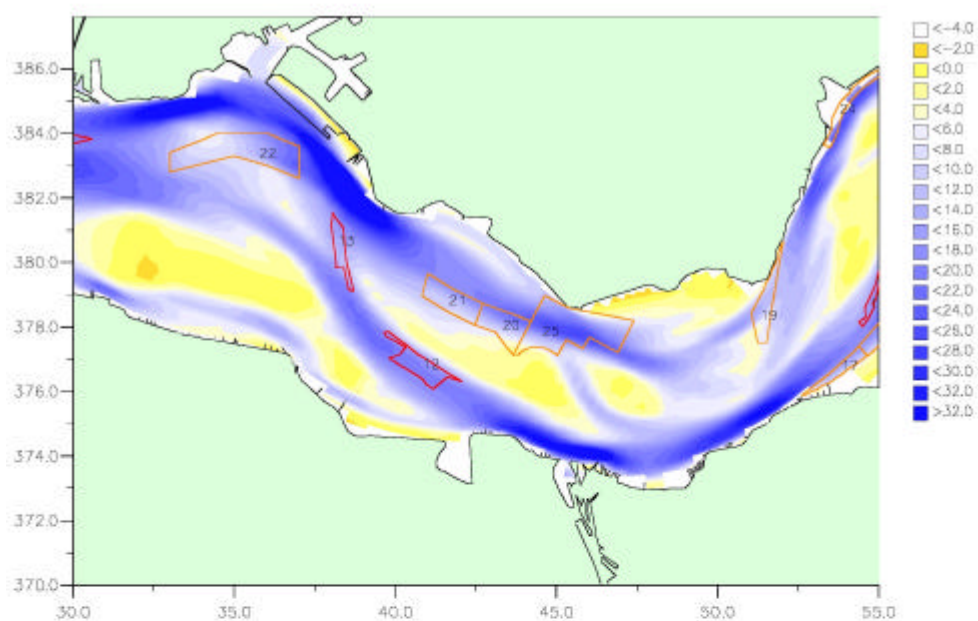
Locatie			Hoeveelheid (Mm <sup>3</sup> /jr)	
Naam	Geul in macrocel	Vak nummer (Figuur 4-1)	Beun	Profiel
<b>Storten, vaargeulonderhoud</b>				
Schaar van Waarde	5 v	12	1,0	0,91
Middelgat	4 e	24	0,7	0,64
Gat van Ossenissee	4 v	16, 17	4	3,64
Ebschaar Everingen	3 v	19	0,3	0,27
Everingen	3 v	20, 21, 25	3	2,73
Ebschaar Spijkerplaat <sup>3</sup>	1 v	22	1,5	1,36
<i>Totaal storten</i>			10,5	9,55
<b>Baggeren, vaargeulonderhoud</b>				
Drempel van Vlissingen	1 e	14	0.37	0.33
Drempel van Borssele	3 e	13	1.05	0.96
Pas van Terneuzen	3 e	12	0.56	0.51
Gat van Ossenissee	4 v	10	0.63	0.57
Overloop van Hansweert	4 v	9	0.51	0.46
Drempel van Hansweert	5 e	8, 7	2.46	2.24
Overloop van Valkenisse	5 e	5, 6	2.20	2.00
Drempel van Valkenisse	6 e	4	1.83	1.66
Nauw van Bath	6 e	4	0.06	0.05
Drempel van Bath	7 e	3	0.83	0.75
<i>Totaal baggeren</i>			10,5	9,55
<b>Baggeren, zandwinning</b>				
Plaatzijde Overloop van Valkenisse	5 e	22, 23, 23, 25, 26, 27, 28, 29	1,0	0,91
Schaar van Waarde	5 v	in stortvak 12	0,6	0,55
Overloop van Hansweert / Plaat van Ossenissee	4 v	16	0,4	0,36
Everingen <sup>2</sup>	3 v	stortvak, 20, 21 en 25	0,6	0,55

Totaal zandwinning			2,6	2,36
--------------------	--	--	-----	------

<sup>1</sup> Voor de invoer van het ESTMORF model zijn de gebaggerde en gestorte hoeveelheden zand in het profiel nodig, de zogenaamde profielkuubs. De hoeveelheden worden echter in het beun gemeten, als beunkuubs (Westererschelde) of als tonnen droge stof (monding). Voor wat betreft de onderhoudsspecie wordt voor de vertaling van beunhoeveelheden naar profielhoeveelheden uitgegaan van een uitlevering ('bulking factor') van 10% (Bray et al, 1997). Voor de specie die vrij komt bij aanleg van een verdieping, de zogenaamde aanlegspecie, zal een bulking factor van 20% worden gehanteerd (Dit is een 'ervaringsfeit', J. Claessens pers com.).

<sup>2</sup> In de twee westelijk gelegen stortvakken.

<sup>3</sup> In de voormalige ebschaar Spijkerplaat. De geul is sinds 1999 praktisch verdwenen.



---

***Figuur 5-1 Overzicht met locaties waar vaargeulonderhoud en zandwinning plaats vindt. Voor hoeveelheden zie Tabel 5-1.***

---

Naast de grootte van de ingrepen is het van belang hoe wordt omgegaan met geleidelijke veranderingen in de hydrodynamische forcering. Naast de zeespiegelstijging en de toename van de getijslag, die besproken zijn in Hoofdstuk 3, is hierbij de 18,6 jarige cyclus in het getij van belang. Deze cyclus beïnvloedt de zandhuishouding van het Schelde-estuarium (Jeuken et al., 2003). De invloed van deze 18,6-jarige hydrodynamische cyclus zal niet worden gemodelleerd omdat in de huidige studie de trends in de morfologische ontwikkeling van belang zijn<sup>3</sup>.

Samenvattend, wordt het nulalternatief gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

- Het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning conform Tabel 5-1. Hierbij moet worden opgemerkt dat in de praktijk het voortzetten van beleid een flexibelere invulling krijgt dan in de berekeningen: het beheer kan en wordt aangepast, binnen de grenzen van het beleid, wanneer de morfologische ontwikkelingen daar aanleiding toe geven<sup>4</sup>.
- Er wordt aangenomen dat de zeespiegelstijging en toename van de getijslag gelijk zijn aan de opgetreden stijging gedurende de drie afgelopen decennia. Dit betekent een zeespiegelstijging van ongeveer 20 centimeter per eeuw en een toename van de getijslag van circa 15 centimeter per eeuw. In ESTMORF worden deze veranderingen in de hydrodynamische forcering impliciet meegenomen, d.w.z. via de wijze waarop het model gekalibreerd is. In SOBEK en het DELFT3D model worden deze processen niet gemodelleerd.
- De 18,6-jarige cyclus in het getij wordt niet gemodelleerd.

### 5.3 Ontwikkelingen in de zandhuishouding

#### 5.3.1 De zandbalans 2001-2030 op basis van ESTMORF

In de navolgende alinea's worden eerst de ontwikkelingen in de zandhuishouding volgens het nulalternatief gepresenteerd op basis van een zandbalans voor de deelperioden 2001-2010 en 2001-2030. Vervolgens wordt op twee manieren gekeken in hoeverre deze voorspelde ontwikkelingen worden beïnvloed door het vaargeulonderhoud en de zandwinning. Op basis van deze informatie wordt in het laatste deel van deze paragraaf de zandbalans geïnterpreteerd.

#### **Resultaten**

Figuur 5-2 toont de zandbalansen voor de twee perioden 2001-2010 en 2001-2030, waarbij het estuarium van de monding tot de grens is onderverdeeld in negen deelgebieden (zie ook Figuur 2-1).

De grootschalige erosie en sedimentatie kunnen als volgt worden gekarakteriseerd (niet expliciet gekwantificeerd in Figuur 5-2):

- Het gehele systeem van Westerschelde en monding samen wordt gekenmerkt door een netto sedimentatie van enkele miljoenen kuubs zand per jaar (orde 3).
- Deze sedimentatie wordt bepaald door het mondingsgebied waar volgens het model een forse aanzanding optreedt (circa 6.5 Mm<sup>3</sup>/jr). Bij nadere inspectie van de resultaten blijkt dit een voortvloeiende te zijn van de veel lager bagger- en stortvolumina in

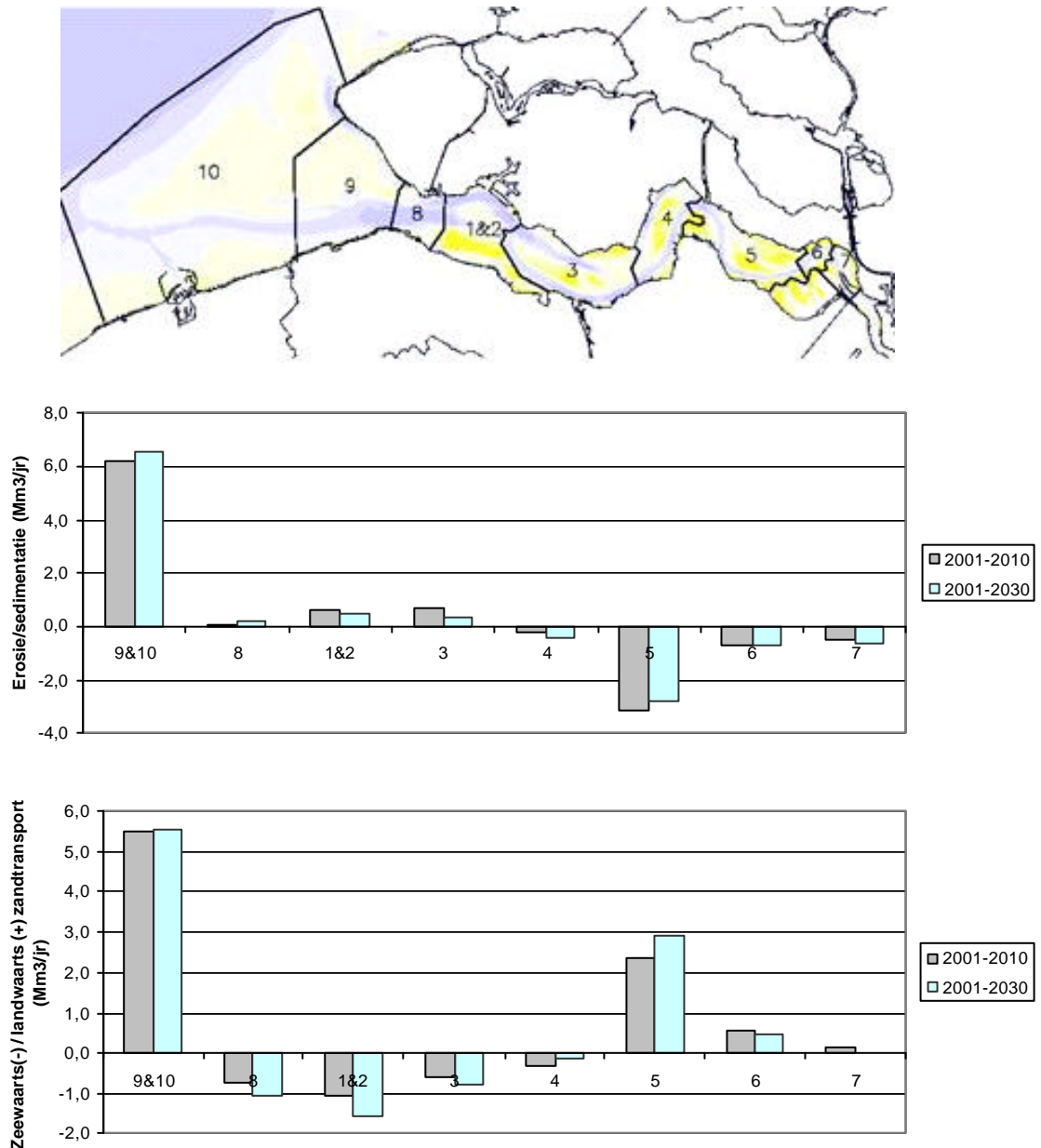
---

<sup>3</sup> Wanneer de 18,6 jarige cyclus wordt meegenomen luistert het heel nauw naar welke deelperioden wordt gekeken om de trends in de morfologische verandering te bepalen.

<sup>4</sup> Een recent voorbeeld is het storten in de ebgeul Middelgat. Naar aanleiding van een evaluatie van het beheer voor vaargeulonderhoud sinds de tweede verruiming wordt er sinds 2003 niet meer gestort in deze geul (zie Hoofdstuk 2).

nulalternatief dan de (waarschijnlijk onjuiste) volumina waarop het mondingsgebied van het ESTMORF model is gekalibreerd. Hierdoor kunnen de voorspelde veranderingen in het mondingsgebied alleen nog vergelijkenderwijs worden gebruikt (zie ook paragraaf 4.1).

- De Westerschelde verruimt met ongeveer  $3.5 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  (niet expliciet getoond in Figuur 5-2) en exporteert 1 a  $1.5 \text{ Mm}^3$  zand per jaar naar het mondingsgebied.



**Figuur 5-2 Zandbalans van Westerschelde en monding gedurende de periode 2001-2030 (in  $\text{Mm}^3/\text{jr}$ ) zoals berekend met ESTMORF. Bovenste figuur toont de totale volume verandering  $\Delta V_{\text{tot}}$ . Positieve verandering = sedimentatie van zand, negatieve verandering = erosie van zand. Het onderste figuur toont de afgeleide residuele zandtransporten op de zeewaartse rand van ieder deelgebied. Voor definities zie Hoofdstuk 2.**

---

---

---

Kijken we wat meer in detail naar de zes deelgebieden in de Westerschelde, dan blijkt er sprake te zijn van duidelijke ruimtelijke verschillen in de erosie en sedimentatietendensen (Figuur 5-2):

- De macrocellen 5, 6 en 7 in het oostelijk deel van de Westerschelde eroderen. In gebied 5 neemt de erosiesnelheid af in de tijd terwijl deze in de gebieden 6 en 7 juist groter wordt.
- Gebied 4, nabij Hansweert (het zogenaamde midden deel van de Westerschelde), erodeert.
- De gebieden 1 & 2 en 3 in het westelijk deel van de Westerschelde worden beiden gekenmerkt door een netto sedimentatie.
- Het overgangsg gebied naar de monding, vak 8, verondiept enigszins.

Deze ruimtelijke patronen van netto erosie en sedimentatie gaan gepaard met een grootschalig patroon van afgeleide 'natuurlijke' zandtransporten: in het oostelijk deel van de Westerschelde, de gebieden 5 tot en met 7, is er sprake van een overwegend landwaarts gericht zandtransport. In het westelijk deel van de Westerschelde, de gebieden 1 & 2 en 3 overheerst een zeewaarts gericht transport. De omslag tussen het landwaarts en zeewaarts transport bevindt zich ergens in gebied 4, ter hoogte van Baarland.

De grote zandtransporten (gemiddeld ca  $3,7 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ ) van macrocel 4 naar macrocel 5 in het oostelijk deel van de Westerschelde, nemen in de tijd iets afneemt. Het landwaarts gerichte zandtransport van cel 5 naar cel 6 neemt eveneens af in de tijd. Het zandtransport tussen macrocel 6 en 7 is verwaarloosbaar klein.

De zeewaartse rand van het meergeulenstelsel, ter hoogte van Vlissingen, wordt gekenmerkt door een zeewaarts gericht netto zandtransport, van circa  $1.5 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ . Dit transport neemt toe in de tijd en af richting monding. Op de zeewaarts gelegen rand van het mondingsgebied is er sprake van een landwaarts gericht transport dat wordt overschat (zie Hoofdstuk 3 onzekerheden).

### ***De invloed van het vaargeulonderhoud en de zandwinning***

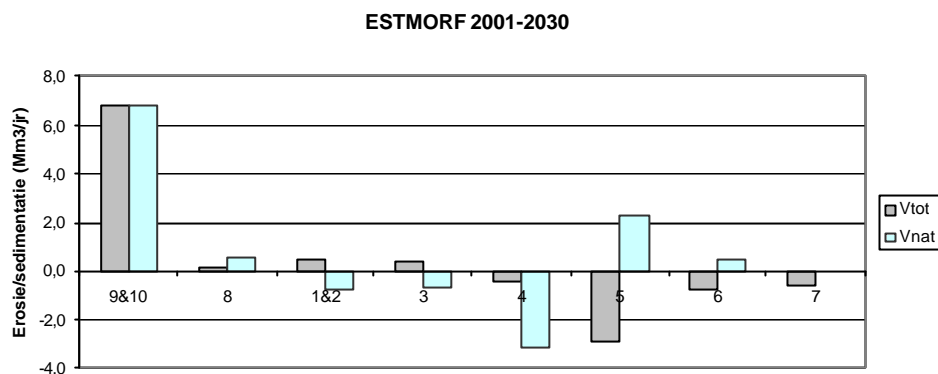
De invloed van het vaargeulonderhoud en de zandwinning op de geschetste ontwikkelingen in de zandbalans wordt op twee manieren gekwalificeerd:

- Door de totale volume veranderingen  $? V_{tot, gem}$  te vergelijken met de afgeleide 'natuurlijke' volume verandering  $? V_{nat, gem}$  (Figuur 5-3, zie ook Hoofdstuk 2).
- Door de totale volume veranderingen volgens het nulalternatief te vergelijken met een berekening waarin geen vaargeulonderhoud en zandwinning wordt uitgevoerd (Figuur 5-4).

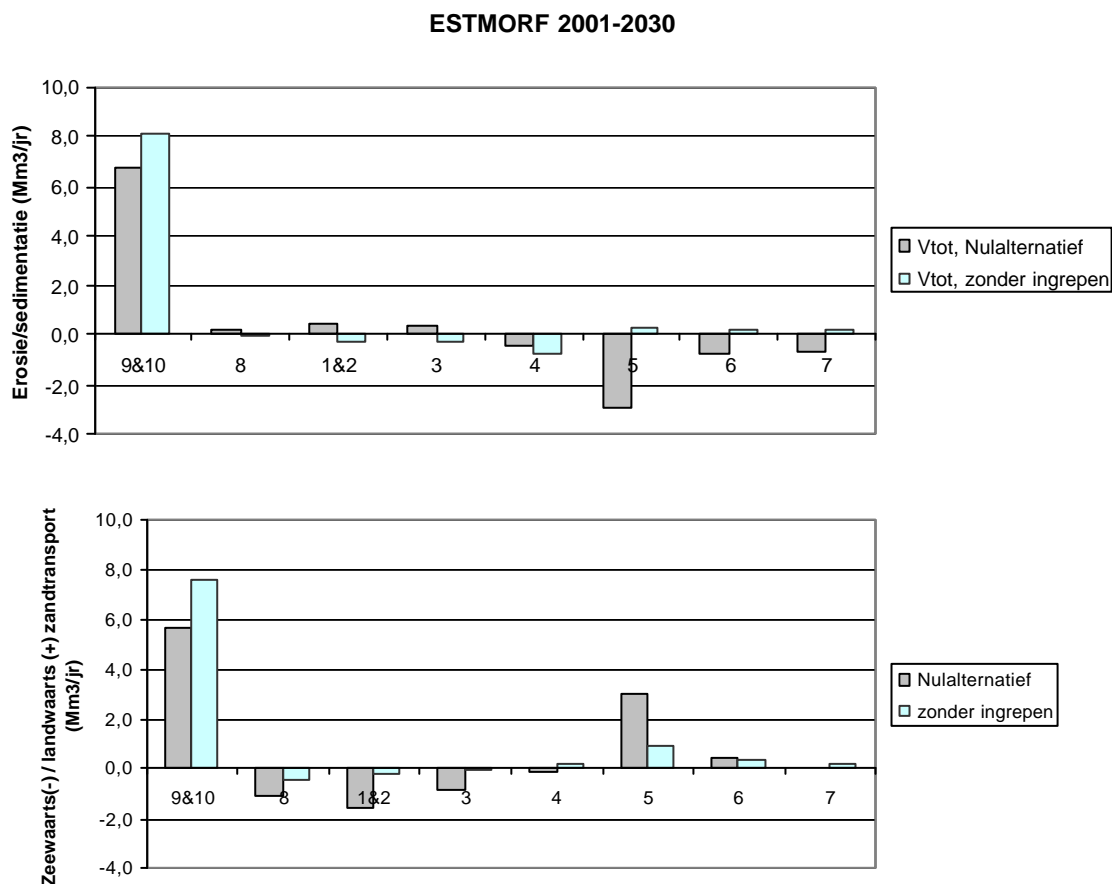
Kijken we naar de resultaten van Figuur 5-3 dan blijkt dat in alle gebieden van de Westerschelde, behalve gebied 4, het baggeren en storten ten behoeve van het vaargeulonderhoud en de zandwinning een sturende invloed heeft gehad:

- De erosie van de gebieden 5, 6 en 7 in het oostelijk deel van de Westerschelde worden bepaald door het netto baggeren van sediment:  $? V_{tot, gem}$  en  $? V_{nat, gem}$  hebben een tegengesteld teken.
- Macrocel 4, nabij Hansweert (het zogenaamde midden deel van de Westerschelde), erodeert van 'nature':  $? V_{tot, gem}$  en  $? V_{nat, gem}$  hebben nog net geen tegengesteld teken wat aan geeft dat het netto storten van bijna  $3 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  een kritische invloed heeft op de netto erosie van dit gebied.

- De sedimentatie in de gebieden 1& 2 en 3 in het westelijk deel van de Westerschelde wordt door het netto storten van sediment.
- Het overgangsgedebied naar de monding, vak 8, wordt enigszins ondieper ondanks het netto baggeren op de drempel van Vlissingen.



**Figuur 5-3** *Vergelijking van de volume veranderingen  $V_{tot}$ , gem en de afgeleide 'natuurlijke' volume verandering  $V_{nat}$ , gem (=  $V_{tot} - V_i$ ). Wanneer de twee volumeveranderingen in een gebied een tegengesteld teken hebben is de invloed van de netto ingrepen sturend geweest. Een negatieve volumeverandering betekent erosie en positieve volumeverandering betekent sedimentatie.*





***Figuur 5-4 Vergelijking van de volume veranderingen  $\Delta V_{tot, gem}$  in het nulalternatief en het alternatief zonder ingrepen. Wanneer de twee volumeveranderingen in een gebied een tegengesteld teken hebben is de invloed van de netto ingrepen sturend geweest. Het beeld voor de periode 2001-2010 is vergelijkbaar met dat voor de periode 2001-2030. Positief getal is sedimentatie. Een negatief getal is erosie.***

Figuur 5-4 toont de totale netto erosie en sedimentatie volgens het nulalternatief en het alternatief zonder ingrepen. Wanneer de volume veranderingen in beide berekeningen een tegengesteld teken hebben kunnen de ingrepen als sturend voor de ontwikkeling worden beschouwd. Wanneer het teken wel gelijk is maar de grootten duidelijk verschillen is er eveneens sprake van een beïnvloeding door ingrepen. De resultaten in Figuur 5-4 bevestigen in grote lijnen de observaties die volgen uit Figuur 5-3: het vaargeulonderhoud heeft een sturende invloed op de ontwikkeling van de zandbalans in het oostelijk deel en het westelijk deel van de Westerschelde. In het middendeel beïnvloedt het netto storten de sedimenthuishouding wel, maar is niet bepalend voor de erosie van het gebied. In gebied 8 spreken beide benaderingen elkaar tegen.

De richting van de grootschalige zandtransporten verandert niet door het stoppen met het vaargeulonderhoud en de zandwinning, de grootte wel (onderste diagram in Figuur 5-4): de zeewaarts gerichte transporten in het westelijk deel en de landwaarts gerichte transporten in oostelijk deel worden versterkt door de ingrepen.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de ESTMORF berekeningen aantonen dat de zandbalans in het nulalternatief sterk wordt beïnvloed door het vaargeulonderhoud en de zandwinning, vooral in het oostelijk deel waar netto gebaggerd wordt en het westelijk deel waar netto gestort wordt.

### **Interpretatie**

Zoals besproken in Hoofdstuk 4 zijn voor de zandbalans de volgende mechanismen van belang:

- De invloed van de totale erosie/sedimentatie,  $\Delta V_{tot, gem}$  op de voortplanting van het getij, het totale getijvolume en het evenwichtsdoorstroomoppervlak,  $A_e$ .
- De invloed van erosie/sedimentatie van de intergetijdengebieden op de komberging, het totale getijvolume en het evenwichtsdoorstroomoppervlak,  $A_e$ .
- De mate waarin het dynamisch evenwicht van deelgebieden wordt verstoord door ingrepen en de invloed daarvan op de grootschalige zandtransporten.

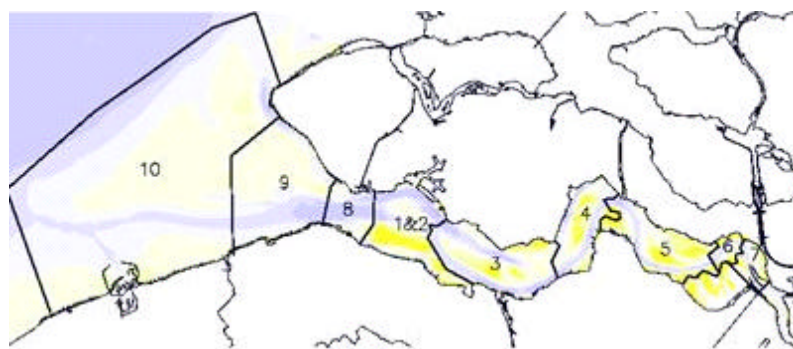
Voor het interpreteren van de zandbalans is het daarom van belang om na te gaan in hoeverre:

- het totale getijvolume verandert als gevolg van wijzigingen in: 1) de getijdoordringing in het estuarium, te karakteriseren met de getijslag langs het estuarium en de vertraging van het hoog water en het laag water ten opzichte van Vlissingen, en 2) de netto erosie en sedimentatie van de intergetijdengebieden.
- de netto erosie/sedimentatie van de deelgebieden wordt bepaald door ingrepen. Als eerste indicatie hiervoor kan worden gekeken naar het teken en de grootte van  $\Delta V_{tot, gem}$  en  $\Delta V_{nat, gem}$ .

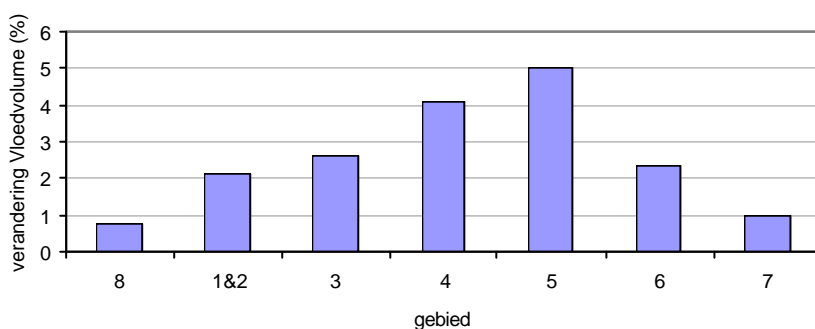
Een inventarisatie van deze aspecten voor de perioden 2001-2030 levert het volgende beeld (zie Figuur 5-5 t/m Figuur 5-7):

In het mondingsgebied van het estuarium verandert het getijvolume weinig. Het totale getijvolume in de Westerschelde neemt gedurende de periode 2001-2030 geleidelijk toe met 3-5% (Figuur 5-5). Deze toename is het gevolg van:

- Een toename van de getijslag landwaarts van Hansweert als gevolg van de netto verdieping van het oostelijk deel door baggeren (Figuur 5-7).
- De loopsnelheid van de getijgolf neemt landwaarts van Hansweert toe, wat ook leidt tot een toename van het getijvolume. De vertragingen van het laag water en het hoog water ten opzichte van Vlissingen worden kleiner. De afname van de vertraging van het laagwater is groter dan dat van het hoogwater. Dit impliceert tevens een afname van de asymmetrie van het verticale getij zoals die kwalitatief op basis van theoretische overwegingen te verwachten is (Wang et al., 2002; Winterwerp et al., in druk).
- Het totale volume zand in de intergetijdengebieden van de Westerschelde neemt af, vooral in het oostelijk deel. Dit zorgt voor een toename van de komberging en het getijvolume in de Westerschelde.

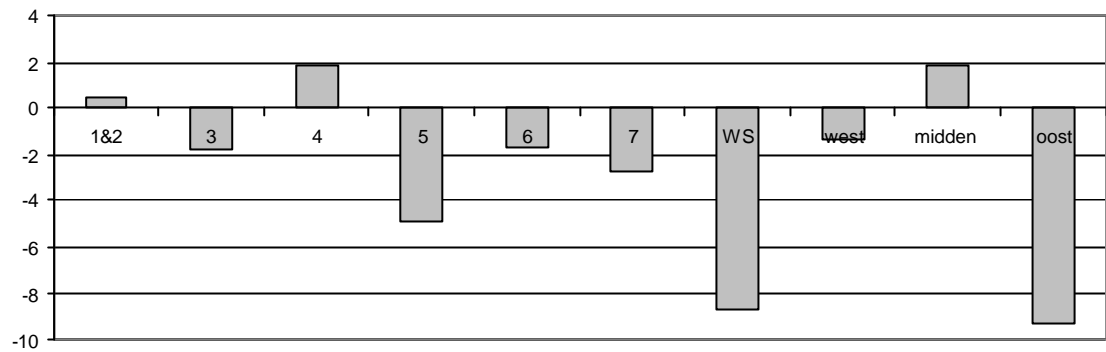


2001-2030

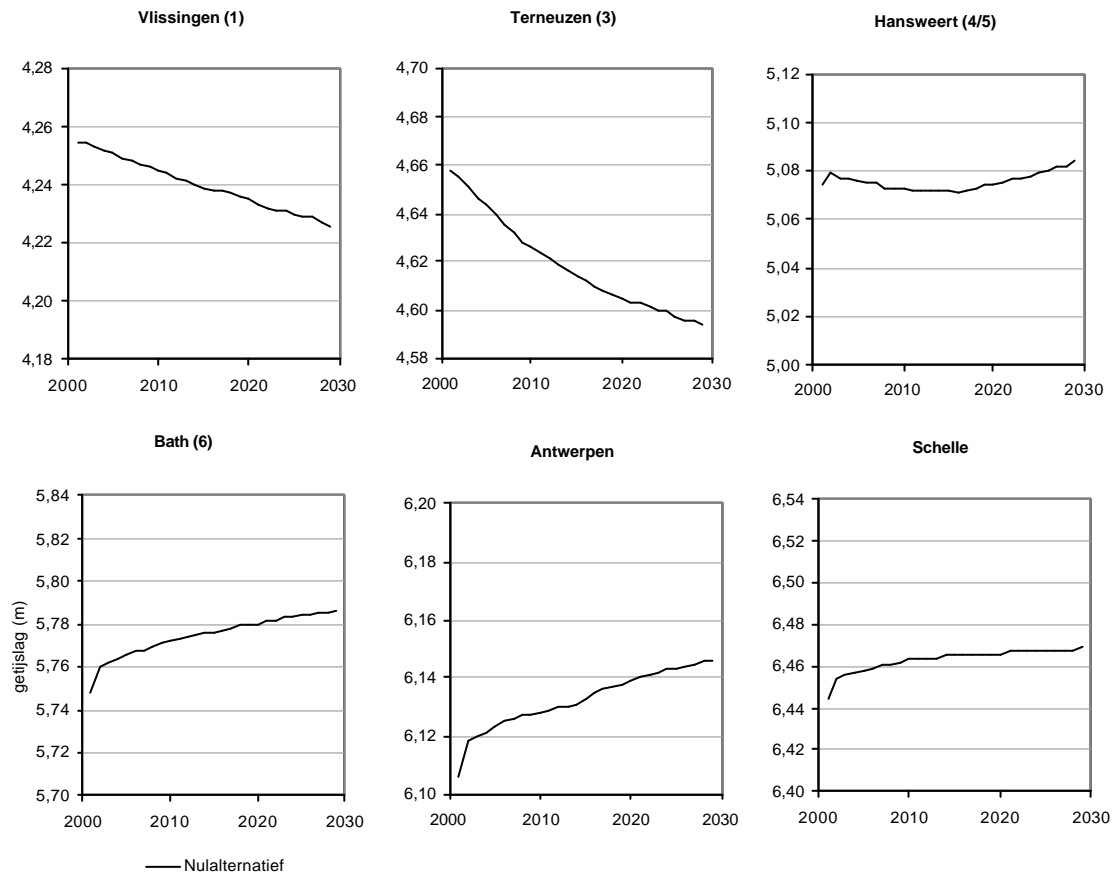


**Figuur 5-5 Procentuele verandering van het vloedvolume langs het estuarium gedurende de periode 2001-2030.**

volumeverandering intergetijdengebied (in Mm3), variabele referentie, 2001-2030, ESTMORF



**Figuur 5-6** Verandering van het zandvolume van de intergetijdengebieden gedurende de periode 2001-2030. De intergetijdengebieden zijn bepaald met het variabele referentieniveau's (zie Hoofdstuk 2).



**Figuur 5-7** Verandering van de getijslag bij gemiddeld springtij. Bij de plaatsnamen van de waterstandsstations is tussen haakjes aangegeven in welke deelgebied van de zandbalans ze liggen.

De toename van het getijvolume resulteert in principe in een toename van het evenwichtsdoorstroomoppervlak met als gevolg een relatieve erosie van de geulen. Echter

---

zoals aangeven in de vorige paragraaf heeft baggeren een sturende invloed gehad op de verdieping van de het oostelijk deel van de Westerschelde. Het doorstroomoppervlak in deze delen van de Westerschelde is beduidend groter dan het evenwichts-doorstroomoppervlak, inclusief de toename van dit oppervlak als gevolg van de toename van het getijvolume. Hierdoor ontstaat er een vrij groot landwaarts gericht netto zandtransport. In de meer zeewaarts gelegen gebieden 1 & 2 en 3 is juist sprake van een verondieping als gevolg van netto storten; het doorstroomoppervlak is hierdoor kleiner dan het evenwichtsdoorstroomoppervlak. Dit effect wordt versterkt door de geringe toename van het evenwichtsdoorstroomoppervlak veroorzaakt door het groter worden van het getijvolume. Als gevolg hiervan vertonen de gebieden 1 en 3 een neiging tot 'natuurlijke erosie' ( $V_{nat}$ ) waarbij het zand in zeewaartse richting wordt getransporteerd. Met andere woorden, de ESTMORF berekeningen suggereren dat met de huidige bagger-stortstrategie circa 10% van de baggervolumina naar zee wordt afgevoerd.

### 5.3.2 Een vergelijking met de resultaten van het SOBEK-model

In Figuur 5-8 en Figuur 5-9 wordt een vergelijking gemaakt tussen de berekende totale netto erosie en sedimentatie ( $V_{tot, gem}$ ) en de afgeleide natuurlijke ( $V_{nat, gem}$ ) erosie en sedimentatie volgens het ESTMORF en SOBEK model.

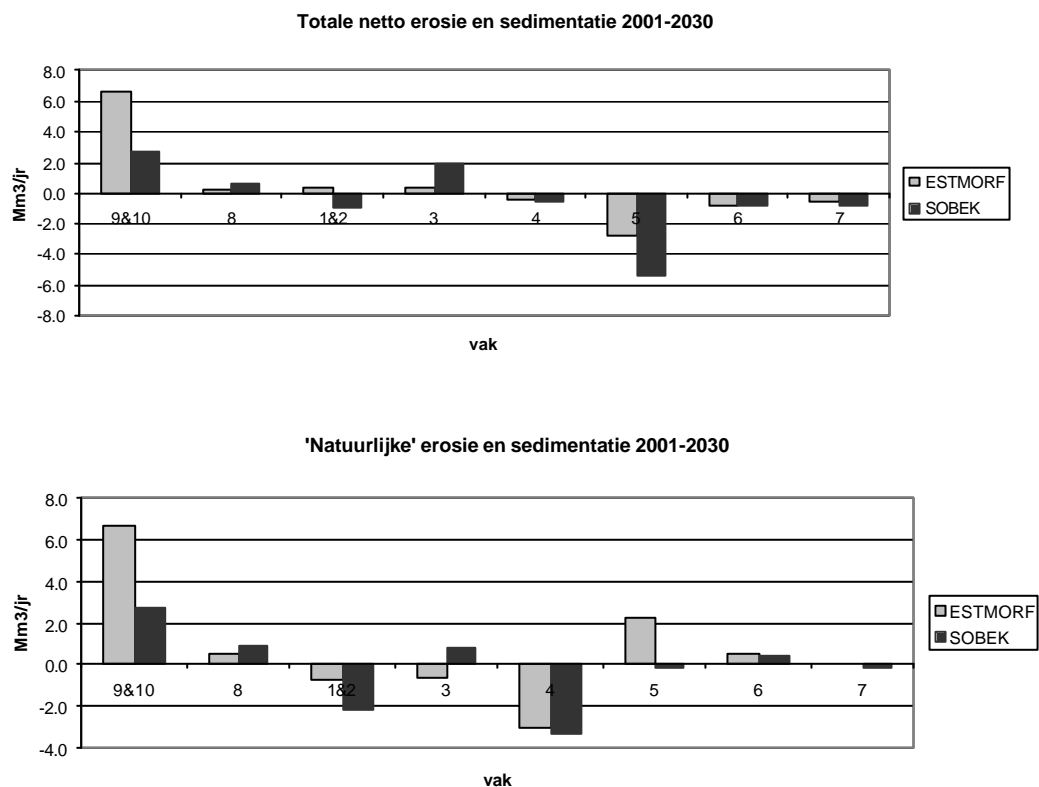
De resultaten van beide modellen komen wat teken betreft redelijk met elkaar overeen, zowel voor de totale- als de 'natuurlijke' volumeveranderingen. Ook de orde van grootte van de veranderingen volgens beide modellen, is ongeveer gelijk hoewel SOBEK over het algemeen wat grotere veranderingen geeft. Dit is inherent aan de toegepaste randvoorwaarden in het SOBEK model (springtij, zie Hoofdstuk 3).

Wat het meeste opvalt, is dat volgens het ESTMORF-model er in macrocel 5 sprake is van een grote natuurlijke sedimentatie terwijl er volgens het SOBEK-model in die cel een lichte erosie optreedt. Verder valt het grote verschil in de mate van sedimentatie in de monding op. Dit kan mogelijk worden verklaard door de overschatting hiervan door het ESTMORF model.

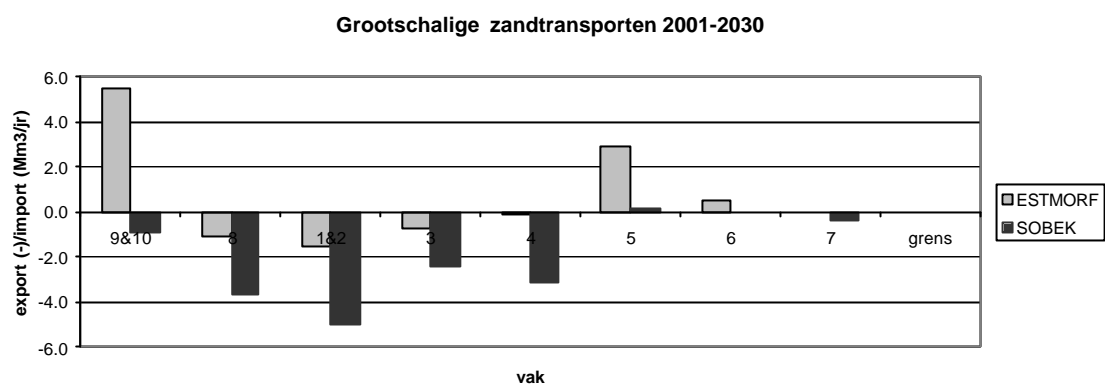
Kijken we naar de verschillen en overeenkomsten in de afgeleide grootschalige zandtransporten (Figuur 5-9), dan zijn de absolute verschillen tussen beide modellen duidelijk groter. Echter het teken van het transport, de tendensen, komen in de meeste gebieden aardig overeen. De verschillen tussen beide modellen ontstaan op de zeewaartse rand van gebied 5 waar ESTMORF een groot landwaarts transport geeft tegen een nagenoeg nul-transport in SOBEK. Dit verschil kan waarschijnlijk worden teruggevoerd op een te grote erosie in de ebgeul van gebied vijf volgens het SOBEK model (Tanczos et al, 2004). In het SOBEK model erodeert de drempel in deze geul (drempel van Hansweert) fors terwijl er in werkelijkheid ruim twee miljoen kuub zand per jaar moet worden gebaggerd om de vaargeul op diepte te houden. Het verschil in sedimentatie op de drempel tussen ESTMORF en SOBEK bepaalt waarschijnlijk in vrij grote mate de verschillen in de zeewaarts gerichte transporten in de gebieden, 4, 3 1 & 2 en 8. Ter hoogte van Vlissingen treedt ook een verschil in de grootte van de export van sediment op, omdat het mesocellen gebied 2 (omgeving vaarwater langs Hoofdplaat) in het ESTMORF model stabiel is en in het SOBEK model erodeert. In werkelijkheid sedimenteert dit gebied al decennia lang, wat betekent dat de voorspelde export waarschijnlijk ongeveer  $0,5 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  kleiner zou moeten zijn in het ESTMORF model (en nog meer in het SOBEK model). Het merendeel van dit

sediment wordt waarschijnlijk aan de zeewaarts zijde van de geul aangevoerd. Dit betekent dat in de toekomst een export van ongeveer 1 Mm<sup>3</sup>/jr waarschijnlijk is.

Samenvattend kan er worden geconcludeerd dat het ESTMORF model en het SOBEK model kwalitatief vergelijkbare tendensen in de zandhuishouding voorspellen. De onzekerheden in de afgeleide transporten zijn het grootst omdat discrepanties tussen beide modellen in gebied vijf zich waarschijnlijk in zeewaartse richting voortplanten. Het ESTMORF model is speciaal ontwikkeld om veranderingen in de zandhuishouding te kunnen simuleren. Bovendien is het model hierop gekalibreerd. Daarom worden de geïnterpreteerde resultaten volgens het ESTMORF model als uitgangspunt genomen voor de vergelijking met de historische ontwikkelingen in de volgende paragraaf. Het feit dat beide modellen kwalitatief vergelijkbare ontwikkelingstendensen voorspellen geeft extra vertrouwen in de resultaten.



***Figuur 5-8 De berekende totale (boven) en natuurlijke (beneden) volumeveranderingen in het nulalternatief volgens het SOBEK en ESTMORF model.***



***Figuur 5-9 Het afgeleide sedimenttransport in het nulalternatief volgens het SOBEK en ESTMORF model.***

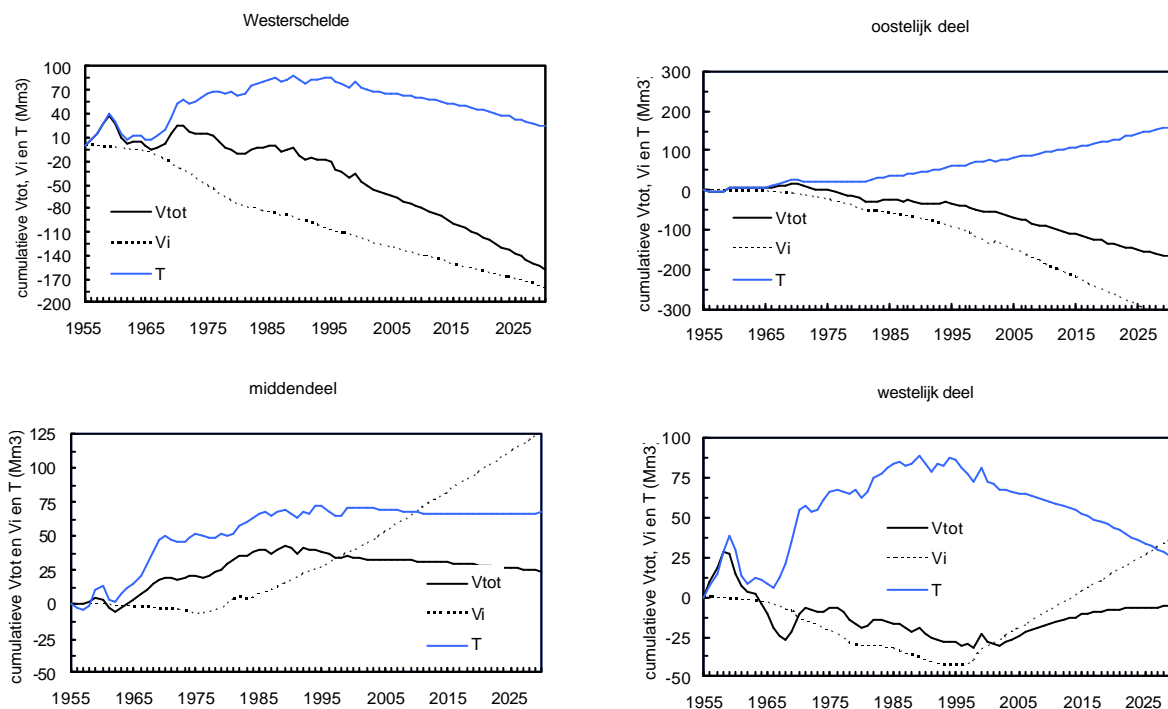
### 5.3.3 Discussie en conclusies zandhuishouding

Op basis van de resultaten zoals beschreven in de voorgaande paragrafen kunnen de toekomstige ontwikkelingen in de zandhuishouding van de Westerschelde als volgt kunnen worden gekarakteriseerd:

- De Westerschelde als geheel verruimt met enkele miljoenen kuubs per jaar en exporteert ongeveer 1 miljoen kubieke meter zand per jaar naar het mondingsgebied.
- Vaargeulonderhoud en zandwinning bepalen de netto erosie en sedimentatie in de verschillende deelgebieden in belangrijke mate:
  - Het oostelijk deel, van Hansweert tot de grens, erodeert als gevolg van baggeren,
  - Het midden deel, nabij Hansweert, erodeert van nature ondanks het netto storten van sediment.
  - Het westelijk deel, tussen Vlissingen en de hoek van Baarland, verondiept als gevolg van het netto storten van sediment.

Deze ontwikkelingen gaan gepaard met een landwaarts gericht zandtransport in het oostelijk deel, vooral ter hoogte van Hansweert, en zeewaarts gerichte transporten in het westelijk deel van de Westerschelde.

Vergelijken we deze toekomstige ontwikkelingen met de historische referentie (zie Figuur 5-10 en paragraaf 4.4) dan betekent dit in grote lijnen een voortzetting van de historische tendensen in de zandhuishouding zoals waargenomen sinds ongeveer 1990. Enige uitzondering hierop is de totale sedimentatie in het westelijk deel waar tot circa 2000 sprake was van een erosie onder invloed van netto baggeren.



**Figuur 5-10 De historische en voorspelde ontwikkelingstendensen in de zandhuishouding van de Westerschelde, het oostelijk deel, het middendeel en het westelijk deel. Hierin staan uitgezet als functie van de tijd: de cumulatieve volumeverandering  $V_{tot}$ ,  $V_i$ , en het cumulatieve afgeleide residuele transport  $T$  op**

---

***de zeewaartse rand van ieder deelgebied. Een dalende lijn betekent erosie, netto baggeren of export. Een stijgende lijn betekent sedimentatie, netto storten en een landwaarts gericht transport.***



---

## 5.4 De stabiliteit van de geulen in de macrocellen

### 5.4.1 De stabiliteit van de geulen op basis van SOBEK

#### ***De invloed van vaargeulonderhoud en zandwinning op de jaarlijkse netto erosie en sedimentatie***

Figuur 5-11 toont de jaarlijkse netto erosie en sedimentatie in de individuele eb- en vloedgeulen in de macrocellen van de Westerschelde voor de perioden 2002-2010<sup>5</sup> en 2010-2030, volgens het SOBEK model. De invloed van vaargeulonderhoud en zandwinning kan als volgt worden gekarakteriseerd:

De erosie in het oostelijk deel van het estuarium, de macrocellen 5, 6 en 7, manifesteert zich met name in de ebgeulen die deel uit maken van de vaargeul. De vloedgeulen tonen een wat wisselend beeld waarbij de ene geul erodeert en de andere vloedgeul juist verondiept:

- De invloed van het baggeren en zandwinnen in de ebgeul is het duidelijkst zichtbaar in cel 5. In deze geul is de totale netto erosie ongeveer vijf keer groter dan de afgeleide en berekende natuurlijke erosie. Dit grote verschil wordt voor een deel (ca 2Mm<sup>3</sup>/jr) veroorzaakt door onjuist gesimuleerde erosie van de drempel van Hansweert. De vloedgeul van cel 5 sedimenteert in de eerste periode van 10 jaar van nature. Deze sedimentatie wordt versterkt door het netto storten. In de volgende 20 jaar is de natuurlijke sedimentatie omgeslagen in erosie, maar door de netto stortingen sedimenteert de geul nog steeds licht.
- Ook in de ebgeul van cel 6 heeft het baggeren een duidelijke, zelfs sturende invloed: het teken van de totale volume verandering duidt op erosie, terwijl de natuurlijke volume verandering sedimentatie aangeeft. De vloedgeul verdiept waarschijnlijk van nature.
- De invloed van het baggeren op de erosie van de ebgeul in cel 7 is wat minder uitgesproken. De vloedgeul verondiept enigszins.

In het middengebied hebben de ingrepen in de geulen geen sturende invloed; de vloedgeul van macrocel 4 erodeert ondanks dat er netto wordt gestort. In de ebgeul van dezelfde cel wordt de natuurlijke sedimentatie iets versterkt door het netto storten van sediment.

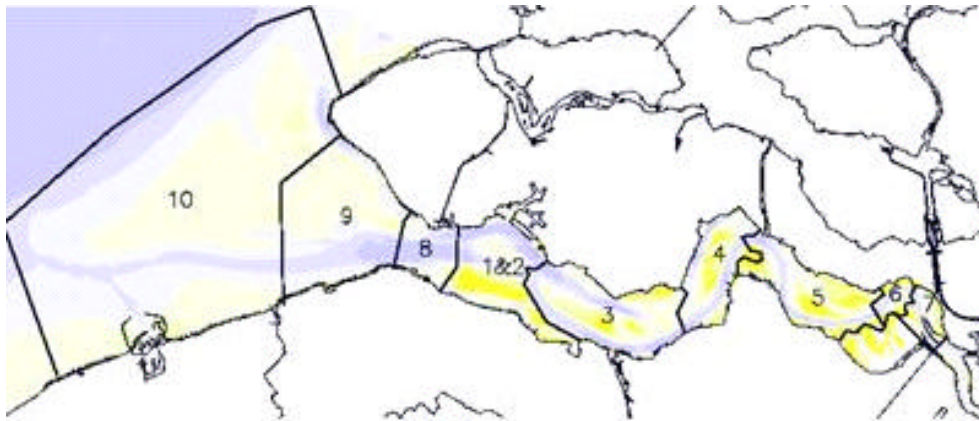
In macrocel 3 blijkt dat het netto storten van sediment in de vloedgeul een kritische invloed heeft op de forse sedimentatie, gedurende de periode 2002-2010. In de periode daarna lijkt dit proces zichzelf te versterken: de totale sedimentatie neemt fors toe (met bijna een factor 2). De ebgeul erodeert van nature, waarbij het netto baggeren de verruiming van de geul versterkt.

In macrocel 1, ter hoogte van Vlissingen heeft het netto storten in de vloedgeul een sturende invloed op de sedimentatie in de geul gedurende de gehele periode 2002-2030: de totale volume verandering is tegengesteld aan de afgeleide en berekende natuurlijke volumeverandering.

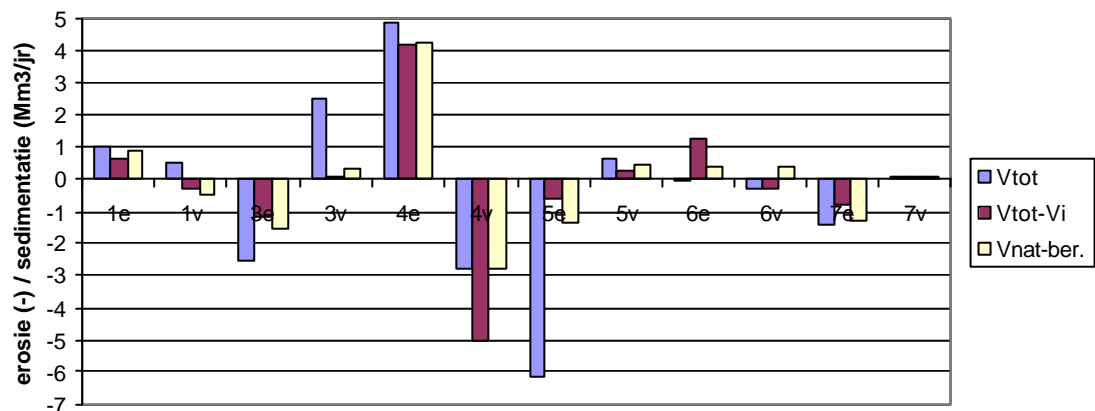
---

<sup>5</sup> Voor het SOBEK model worden de erosie en sedimentatie volgens het eerste jaar van de simulatie buiten beschouwing gelaten i.v.m. inspeleffecten in sommige geulen.

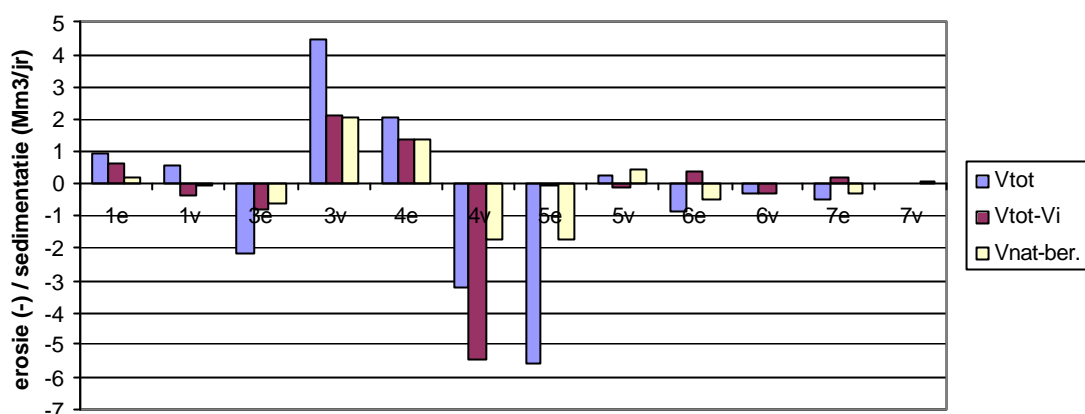
Tot slot moet worden opgemerkt dat de typering van de invloed van ingrepen waarschijnlijk wordt onderschat doordat de voorspelde morfologisch ontwikkeling te groot is, c.q. overdreven wordt door het gebruik van een springtij als randvoorwaarde.



**SOBEK 2002-2010**



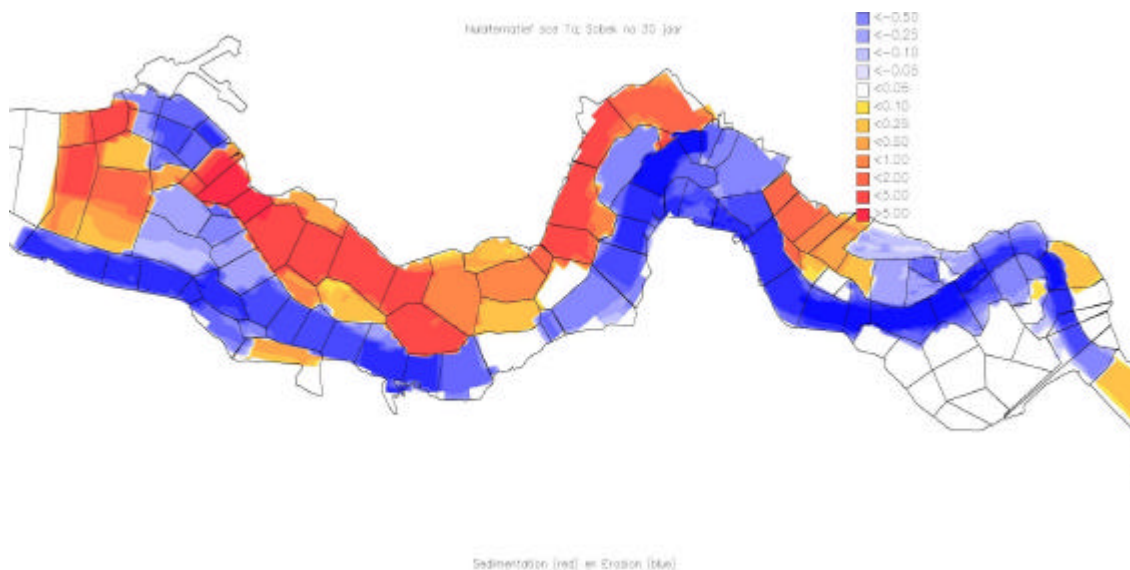
### SOBEK 2010-2030



**Figuur 5-11 De volumeveranderingen in de individuele geulen van de macrocellen.** *Vtot*=de totale netto volume verandering volgens het nulalternatief. *Vtot-Vi* = het afgeleide natuurlijke effect volgens het nulalternatief. *Vnat-ber.*= de berekende natuurlijke erosie en sedimentatie volgens de simulatie zonder ingrepen.

### Diepteveranderingen en kanteling van de geulen in de macrocellen

Figuur 5-12 toont een erosie-sedimentatiekaart op basis van de SOBEK-berekening. Deze geeft in een oogopslag een eerste impressie van de diepteveranderingen en de richting waarin het geulsysteem van de eb- en vloedgeulen in de macrocellen kantelt. De ruimtelijk gemiddelde diepte veranderingen per geul en de kantelingindex van de macrocellen worden gekwantificeerd in Figuur 5-13. In dit figuur worden de ontwikkelingen volgens het nulalternatief SOBEK, het SOBEK alternatief zonder ingrepen samen met de voorspelde veranderingen volgens het ESTMORF model getoond. De resultaten voor het nulalternatief en het alternatief zonder ingrepen geven enerzijds een indicatie van de invloed van vaargeulonderhoud en zandwinning op de voorspelde morfologische verandering. Anderzijds kunnen de resultaten ook worden gebruikt om een beeld te krijgen van de onzekerheden in de voorspelling, gezien de beperkte kalibratie van het SOBEK model binnen de huidige studie (zie Tanczos et al, 2004).



**Figuur 5-12 Erosie- sedimentatie volgens het nulalternatief SOBEK gedurende de periode 2001-2030. De schaal loopt van -5m tot +5m. Blauw is erosie (negatief). Oranje is sedimentatie (positief).**

Concentreren we ons op de voorspelde ontwikkeling volgens het SOBEK model dat kunnen de volgende morfologische veranderingen worden waargenomen (Figuur 5-12 en Figuur 5-13; de vergelijking met ESTMORF volgt in de volgende paragraaf):

De geulsystemen in het oostelijk deel van de Westerschelde, de macrocellen 5, 6 en 7, kantelen richting de ebgeul / vaargeul onder invloed van het netto baggeren in de vaargeul:

- In cel 5 neemt de gemiddelde diepte van de ebgeul in dertig jaar tijd met 1 tot 5 meter toe. Een verdieping van 5 meter is waarschijnlijk een forse overschatting doordat enerzijds de drempels eroderen waar in de praktijk gebaggerd moet worden. Anderzijds zal deze voorspelde respons te groot zijn omdat berekening is gebaseerd op gemiddelde springtijcondities (Hoofdstuk 3). De vloedgeul(en) verondiept met ongeveer een halve meter. Het verschil tussen de twee SOBEK voorspellingen is verwaarloosbaar klein (Figuur 5-13a).

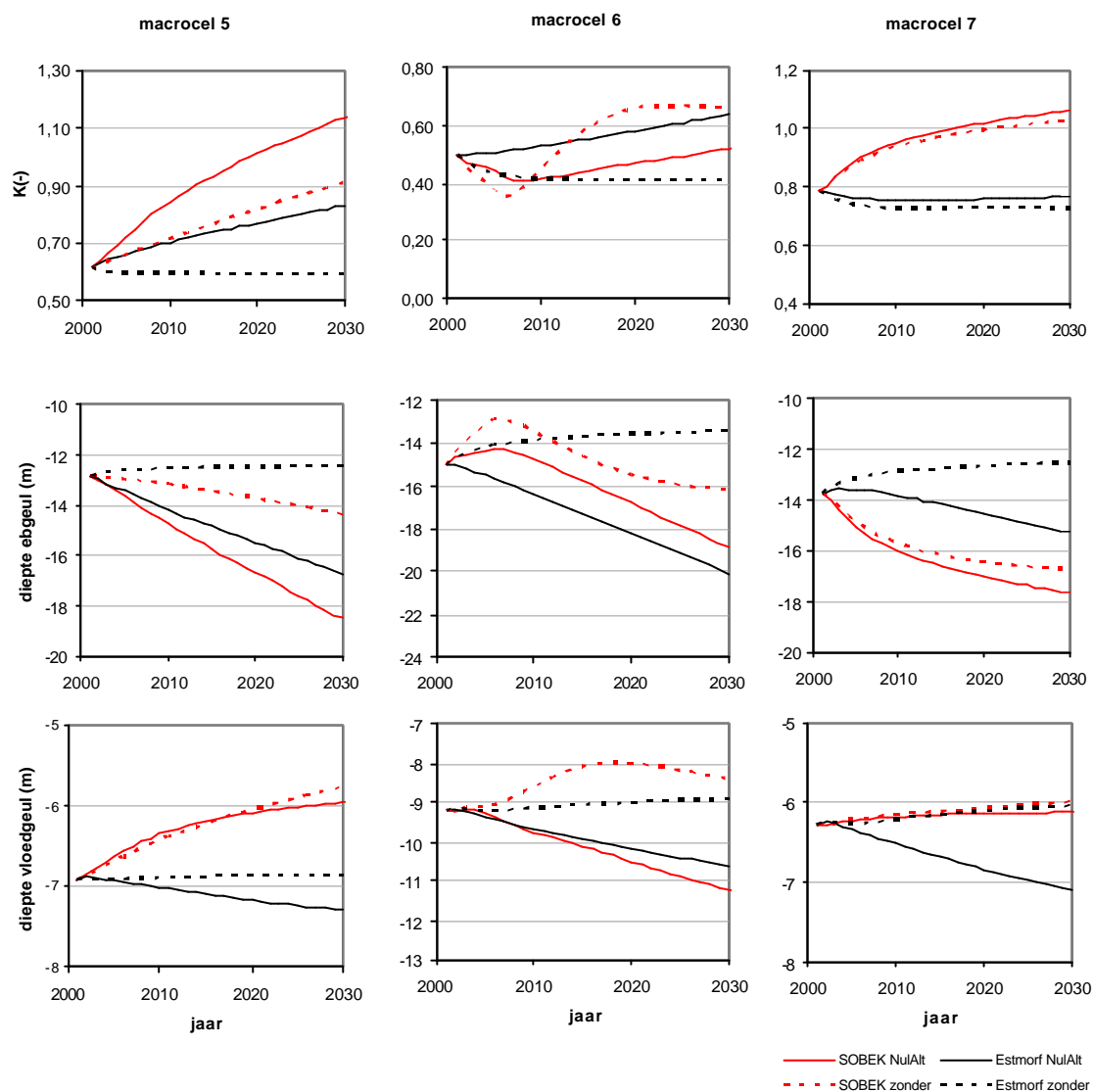
- 
- In macrocel 6 verdiept de ebgeul gemiddeld met 2 tot 4 meter gedurende de periode 2002-2030. Ook de vloedgeul erodeert en verdiept met maximaal 2 m. De vergelijking van de twee alternatieven laat zien dat het vaargeulonderhoud in de omringende geulen ook van invloed is op de ontwikkeling van de vloedgeul, voornamelijk gedurende de eerste 10-15 jaar. Het dieper worden van de ebgeulen in het nulalternatief gaat gepaard met een sedimenttransport van de vloedgeul naar de omringende ebgeulen, waar blijkbaar een fors tekort aan sediment ontstaat.
  - In macrocel 7 zijn de verschillen tussen de twee voorspellingen klein: de ebgeul wordt in dertig jaar ongeveer twee meter dieper, terwijl de vloedgeul min of meer stabiel is.

Macrocel 4, in het middendeel, is een potentieel probleemgebied. De voorspelling geeft aan dat de ebgeul snel zal verondiepen met ongeveer 3 meter gedurende de periode 2002-2030 door een sterke natuurlijke aanzanding die wordt versterkt door het netto storten. De snelheid waarmee de geul verondiept neemt in de tijd af en lijkt op een tijdschaal van 30 jaar naar een nieuw evenwicht te gaan, waarbij de geul 3 tot 4 meter ondieper is geworden dan in 2001. De vloedgeul verdiept met 2 tot 4 meter in dertig jaar tijd, ondanks het netto storten. Dit betekent een sterke kanteling van het geulsysteem. Hoewel de voorspellingen in lijn zijn met de historische ontwikkelingen (Hoofdstuk 4) moet wel worden opgemerkt dat een invloed van de netwerkschematisatie op deze voorspelde sedimentatie in de ebgeul niet uit te sluiten is: het gebied rond de Drempel van Baarland en de Everingen is een van de meest complexe en dynamische gebieden in de Westerschelde (Jeuken, 2000) waar een rigide netwerkschematisatie geen recht aan doet.

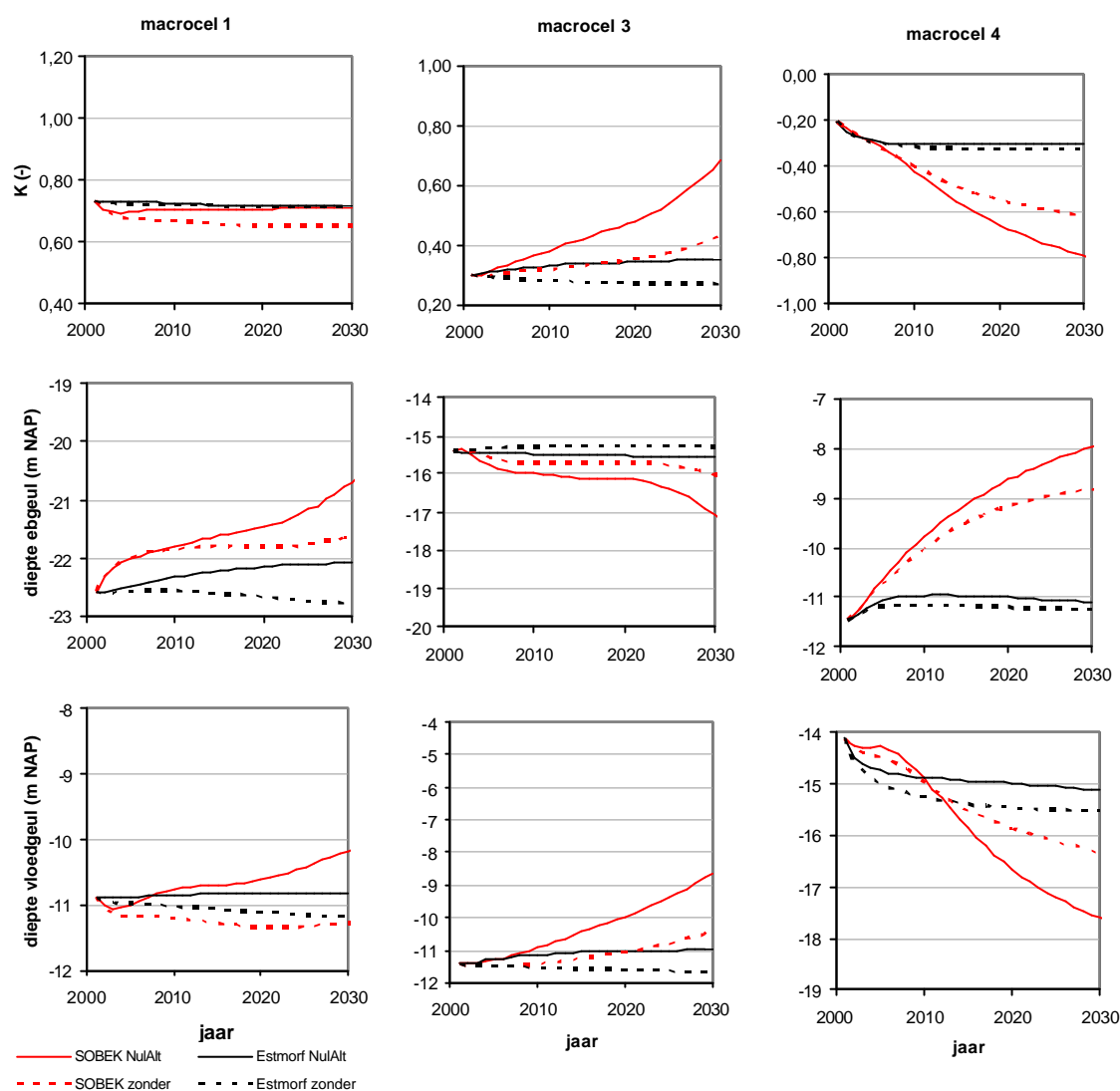
Macrocel 3 in het westelijk deel van de Westerschelde is een ander potentieel probleemgebied. Ook hier kantelt het geulsysteem richting vaargeul. Echter, niet zo zeer als gevolg van netto baggeren in de vaargeul/ebgeul, maar als gevolg van storten in de vloedgeul Everingen (zie ook Figuur 5-11). Het netto storten gaat gepaard met een verondieping van de geul van enkele meters. De snelheid waarmee de geul verondiept toeneemt in de tijd. Dit duidt op een instabiele situatie: wanneer de verondieping als gevolg van netto storten een zekere kritische grootte overschrijdt, neemt de hydraulische ruwheid in de geul snel toe, met als gevolg dat er minder water door de verondiepte geul, en meer water door de verdiepte geul stroomt. Het gevolg is dan een afnemende transportcapaciteit in de verondiepte geul. Dit is een zichzelf versterkend proces: de verondiepte geul wordt steeds (sneller) ondieper waardoor de geul bij voldoende beschikbaar sediment kan degenereren. Dit is een situatie, die vanuit het oogpunt van de instandhouding van het dynamische meergeulensysteem niet mag optreden.

De ebgeul verdiept enigszins, vooral tijdens de eerste vijf jaar en na 2020. De ontwikkelingen in de vloedgeul vinden hun weerslag in de kantelingindex, die aangeeft dat ebgeul relatief verdiept ten opzichte van de vloedgeul.

De meest westelijk gelegen macrocel 1 tot slot, is redelijk stabiel wanneer naar de kantelingindex wordt gekeken. Kijken we naar het verloop van de gemiddelde diepte in beide geulen dan blijkt dat zowel de ebgeul (vaargeul) als de vloedgeul iets ondieper wordt. Het is echter de vraag of aan deze voorspelde ontwikkeling veel waarde mag worden gehecht gezien het dynamische karakter van de kortsluitgeulen in dit gebied dat niet met een netwerkmodel kan worden gesimuleerd (zie paragraaf 5.6).



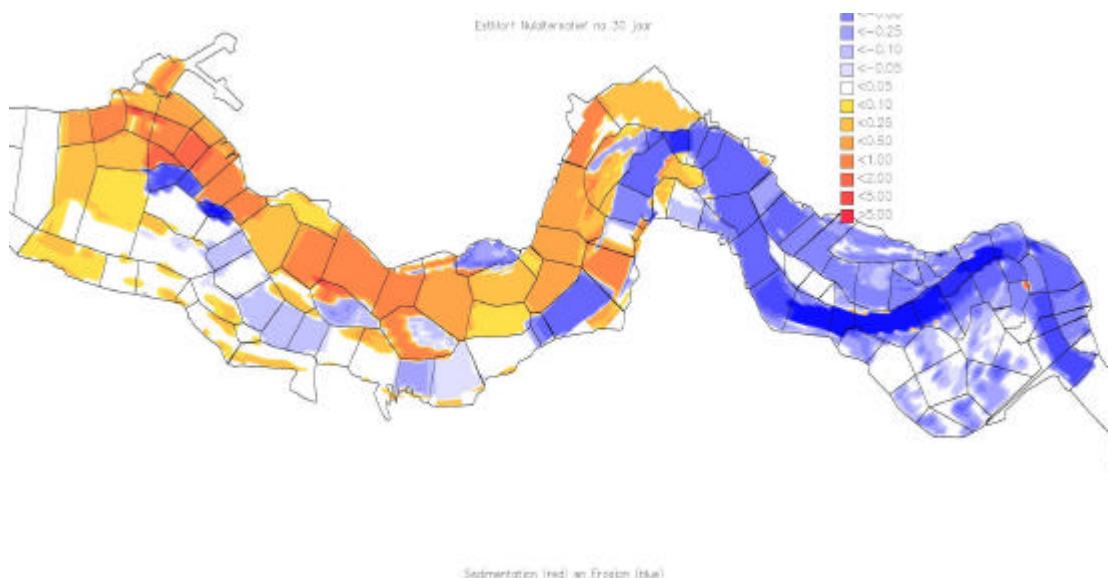
**Figuur 5-13 a De gemiddelde diepte van de geulen t.o.v. NAP -2 m in de macrocellen 5, 6 en 7 volgens het SOBEK en ESTMORF model. Nulalt betekent Nul alternatief, zonder betekent het alternatief zonder ingrepen.**



**Figuur 5-13 b. De gemiddelde diepte van de geulen t.o.v. NAP -2 m in de macrocellen 1, 3 en 4 volgens het SOBEK en ESTMORF model.**

#### 5.4.2 Vergelijking met de resultaten volgens ESTMORF

Een eerste impressie van de overeenkomsten en verschillen tussen SOBEK en ESTMORF wordt verkregen door de erosie- en sedimentatiekaarten volgens beide modellen te vergelijken. Figuur 5-14 toont deze kaarten volgens het ESTMORF model. Zo op het eerste oog laat ESTMORF dezelfde tendensen zien als het SOBEK model. De diepte veranderingen volgens het SOBEK model zijn meer uitgesproken dan de veranderingen volgens het ESTMORF model. De verschillen tussen beide modellen worden in Figuur 5-14 wat meer expliciet gekwantificeerd. Kijken we in eerste instantie naar de kantelingindex dan doen de grootste verschillen zich voor in de macrocellen 3, 4 en 7:



**Figuur 5-14 Erosie-sedimentatiepatronen 2001-2030 volgens het Nul-alternatief ESTMORF.**

In macrocel 7, nabij de grens, kantelt het geulsysteem volgens het SOBEK model richting de vaargeul, terwijl het in het ESTMORF model het geulsysteem iets richting vloedgeul kantelt. Dit verschil in kanteling hangt samen met de voorspelde ontwikkeling in de vloedgeulen: in ESTMORF erodeert de vloedgeul terwijl in het SOBEK model de vloedgeul min of meer stabiel is. In beide modellen verdiept de ebgeul met 1 à 2 meter. Gelet op de waargenomen erosie van de vloedgeul sinds 1970 (Hoofdstuk 4) en het feit dat er in de vloedgeul niet gestort wordt, lijkt een geringe toekomstige erosie van de vloedgeul wel waarschijnlijk. Dit zou dan betekenen dat de kantelindex van het geulsysteem min of stabiel blijft. In de andere twee macrocellen 5 en 6 in het oostelijk deel vertonen de kantelingindices volgens beide modellen dezelfde langtermijn tendensen: een relatieve toename van de diepte in de ebgeul ten opzichte van de vloedgeul<sup>6</sup>.

De meest opvallende en belangrijke verschillen doen zich voor in de ebgeul van macrocel 4, ter hoogte van Hansweert, en in de vloedgeul van macrocel cel 3 (zie Figuur 5-13). Volgens het ESTMORF model stabiliseert de kanteling van het geulsysteem in deze twee gebieden op een termijn van 10-15 jaar. Het SOBEK model geeft echter aan dat de ebgeul van cel 4 en vloedgeul van cel 3 substantieel verondiepen; de geulen degenereren niet op een tijdschaal van 30 jaar maar het karakter van de macrocellen verandert als gevolg van deze sedimentatie waarschijnlijk wel. Zeker in macrocel 3, waar in 2001 twee gelijkwaardige geulen aanwezig zijn, voorspelt het SOBEK model een ontwikkeling van de vloedgeul die overeenkomsten vertoont met de historische morfologische veranderingen in macrocel 5 in het oostelijk deel van de Westerschelde. De meest waarschijnlijke ontwikkeling in de twee macrocellen is er vermoedelijk een die tussen de voorspelling van beide modellen in ligt.

<sup>6</sup> In de vloedgeul van macrocel 5 voorspelt SOBEK een sedimentatie en ESTMORF een erosie. Dit verschil heeft weinig invloed op de voorspelde tendens van kanteling richting ebgeul.



---

### 5.4.3 Discussie en conclusie

Een rigide voortzetting van het huidige beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning, het nulalternatief, betekent dat de geulsystemen in de meeste macrocellen, behalve in cel 1 (nabij Vlissingen, stabiel) en 7 (nabij de grens, stabiel), kantelen richting de vaargeul als gevolg van:

- baggeren in de vaargeul (macrocellen 5 en 6).
- storten in de vloedgeul (macrocel 3)
- natuurlijke erosie in de vloedgeul (vaargeul) en storten in de ebgeul (nevengeul) (macrocel 4).

De geulen in de macrocellen 1 en 7 verondiepen en verdiepen respectievelijk. Deze sedimentatie (cel 1) en erosie (cel 7) gaan echter niet gepaard met een duidelijke kanteling van het geulsysteem.

De voorspelde kanteling van de geulsystemen in het oostelijk deel, macrocel 5 en 6, passen in het beeld van de historische waarnemingen (zie Figuur 5-15). De verdieping van de ebgeulen ten opzichte van de vloedgeulen is geen bedreiging voor de instandhouding van het twee-geulensysteem, omdat de kanteling door netto baggeren wordt veroorzaakt en niet door netto storten. De voorspelde kanteling en erosie van het geulsysteem kan wel leiden tot een erosie van de intergetijdengebieden (zie ook paragraaf 5.6).

Het kantelen van de geulen in de macrocellen 3 en 4 kan wel worden gezien als een potentiële bedreiging voor de instandhouding van het meergeulensysteem. Om hier meer duidelijkheid over te krijgen is een vergelijking van de voorspelde ontwikkelingen met de historische ontwikkelingen van belang (zie Figuur 5-15):

Historisch gezien worden de kantelingen van het geulsysteem in macrocel 3 bepaald door de morfologische ontwikkelingen in de vloedgeul (de ebgeul is een redelijk stabiele geul). De vloedgeul wordt gekenmerkt door een natuurlijke erosie gedurende de periode 1960-1996. Deze erosie en de gemiddelde diepteveranderingen (+1m en -0.6m in 20 jaar tijd, Figuur 5-15) van de geul manifesteren zich in het landwaarts gelegen deel van de geul en hangen nauw samen met het morfologisch gedrag van de kleinere kortsluitgeulen die daar voorkomen (Jeuken, 2000). Sinds de tweede verdieping (1997) wordt de vloedgeul gekenmerkt door een geringe netto sedimentatietendens en een verdere verondieping van de geul. In tegenstelling tot de periode 1960-1996, wordt deze sedimentatie sinds 1997 niet veroorzaakt door natuurlijke processen maar door netto stortingen van baggerspecie (gemiddeld  $3.2 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  gedurende de periode 1997-2002, Jeuken et al, 2003).

In het nulalternatief wordt in de vloedgeul netto  $2,4 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  gestort, dus minder dan tijdens de laatste periode 1997-2002. De voorspelde morfologische repons is een verondieping van de geulen van 0.5-1,5 m in 20 jaar tijd, die zichzelf versterkt<sup>7</sup> en na dertig jaar is opgelopen tot 1-2,5m. Met name het zichzelf versterkende karakter en het feit dat de sedimentatie door storten wordt veroorzaakt zijn kritisch als het gaat om het behouden van het karakter van het geulsysteem. Na dertig jaar is de vloedgeul niet verzand maar gemiddeld wel beduidend ondieper geworden, ook meer dan in de afgelopen decennia het geval was. Van een systeem met twee min of meer even grote geulen wordt de ebgeul in het nulalternatief duidelijk groter/dieper dan de vloedgeul. Dit kan weer consequenties hebben voor de instandhouding van de kortsluitgeulen in de mesocellen (zie ook paragraaf 5.5).

---

<sup>7</sup> de sedimentatiesnelheid neemt toe in de tijd (zie Figuur 4-9)

---

Het geulsysteem in macrocel 4, nabij Hansweert, kantelt al decennia lang richting de vloedgeul (vaargeul). De historische gegevens laten zien dat sinds tenminste 1931 de ebgeul verondiept en de vloedgeul dieper wordt. Rond 1951 versnelde dit proces zich doordat er een bochtafsnijding optrad waarbij de grote ebgeul werd 'afgesneden' door een kortsluiting in het drempelgebied van de grote vloedgeul (voor details zie o.a. Jeuken, 2000). Omstreeks 1988 stopte het sedimentatieproces in de ebgeul, de erosie van de vloedgeul zette zich voort. In de periode 1997-2002 kregen de sedimentatie in de ebgeul, de erosie van de vloedgeul en de kanteling van het geulsysteem een forse nieuwe impuls.

---

Deze impuls is waarschijnlijk veroorzaakt door grote netto stortingen in de ebgeul, van gemiddeld  $2 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ , al dan niet in combinatie met sterk verminderde netto stortingen in de vloedgeul (zie Figuur 5-15 en Jeuken et al, 2003; in deze periode werd er netto slechts  $0.2 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  in de vloedgeul gestort tegen  $2.0 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  in de periode 1990-1997). De gemiddelde diepte in de ebgeul nam met 1,5 meter af terwijl deze in de vloedgeul met ongeveer 1,5 meter toenam (zie Figuur 5-15). Sinds 2003 wordt er niet meer in de ebgeul gestort, en wordt er weer meer in de vloedgeul gestort. Het is nog niet duidelijk of daarmee de kanteling van het geulsysteem afneemt of zich onverminderd voortzet. Als de kanteling zich onverminderd voort blijkt te zetten zou er wel eens een onomkeerbaar proces in gang kunnen zijn gezet.

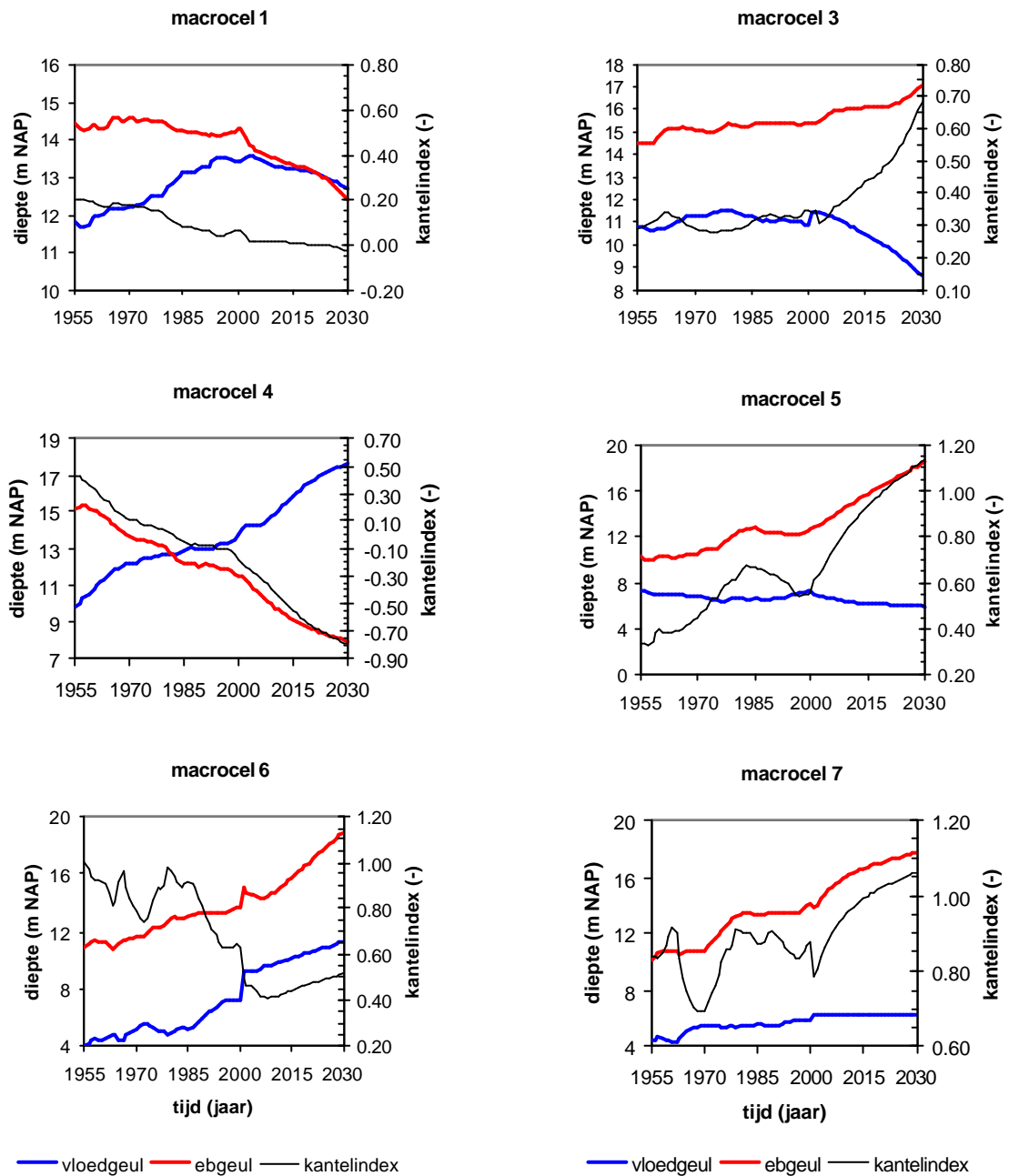
Kijken we naar het nulalternatief dan laten de SOBEK modelresultaten een kanteling en diepteverandering zien die vergelijkbaar is met de waarnemingen sinds 1997, zowel qua trend als qua orde van grootte (Figuur 5-15). Een positief puntje in de voorspelde ontwikkeling is dat de verondieping van de ebgeul en de verdieping van de vloedgeul na verloop van tijd afnemen. Dit duidt op het bereiken van een nieuw evenwicht waarbij de ebgeul 3 tot 4 meter is verondiept en de vloedgeul met dezelfde orde van grootte is verdiept. Kijken we naar de voorspelde ontwikkeling in de kantelingindex dan duidt deze op een verandering in de verhouding van de omvang tussen beide geulen richting een geulsysteem dat vergelijkbaar is met de macrocellen 5 en 6<sup>8</sup>. Dit kan worden beschouwd als een geleidelijke verandering van het karakter van het geulsysteem waarbij ontwikkelingen uit het verleden zich in de toekomst voortzetten. Hoewel een invloed van de netwerkschematisatie niet is uit te sluiten, kan de voorspelde tendens van geulontwikkeling en kanteling wel als realistisch worden beschouwd.

Samenvattend, betekent het nulalternatief een voortzetting en versterking van de waargenomen kanteling van het geulsysteem in het oostelijk en midden deel van de Westerschelde. Voor macrocel 3 levert het nulalternatief een afwijkend beeld op in die zin, dat de vloedgeul historisch gezien wordt gekenmerkt door erosie, terwijl sinds de tweede verruiming en in het nulalternatief een omslag naar sedimentatie/verondieping optreedt die het gevolg is van netto storten. De voorspelde ontwikkelingen voor de macrocellen 3 en 4 duiden op een verandering van het karakter van het geulsysteem, waarbij een stelsel van twee min of meer even grote/diepe geulen verandert in een systeem waarbij de vaargeul duidelijk groter wordt ten koste van de nevengeul. Figuur 5-16 toont ter illustratie hiervan de bodemligging in 2001 en 2030 volgens het SOBEK model en het ESTMORF model.

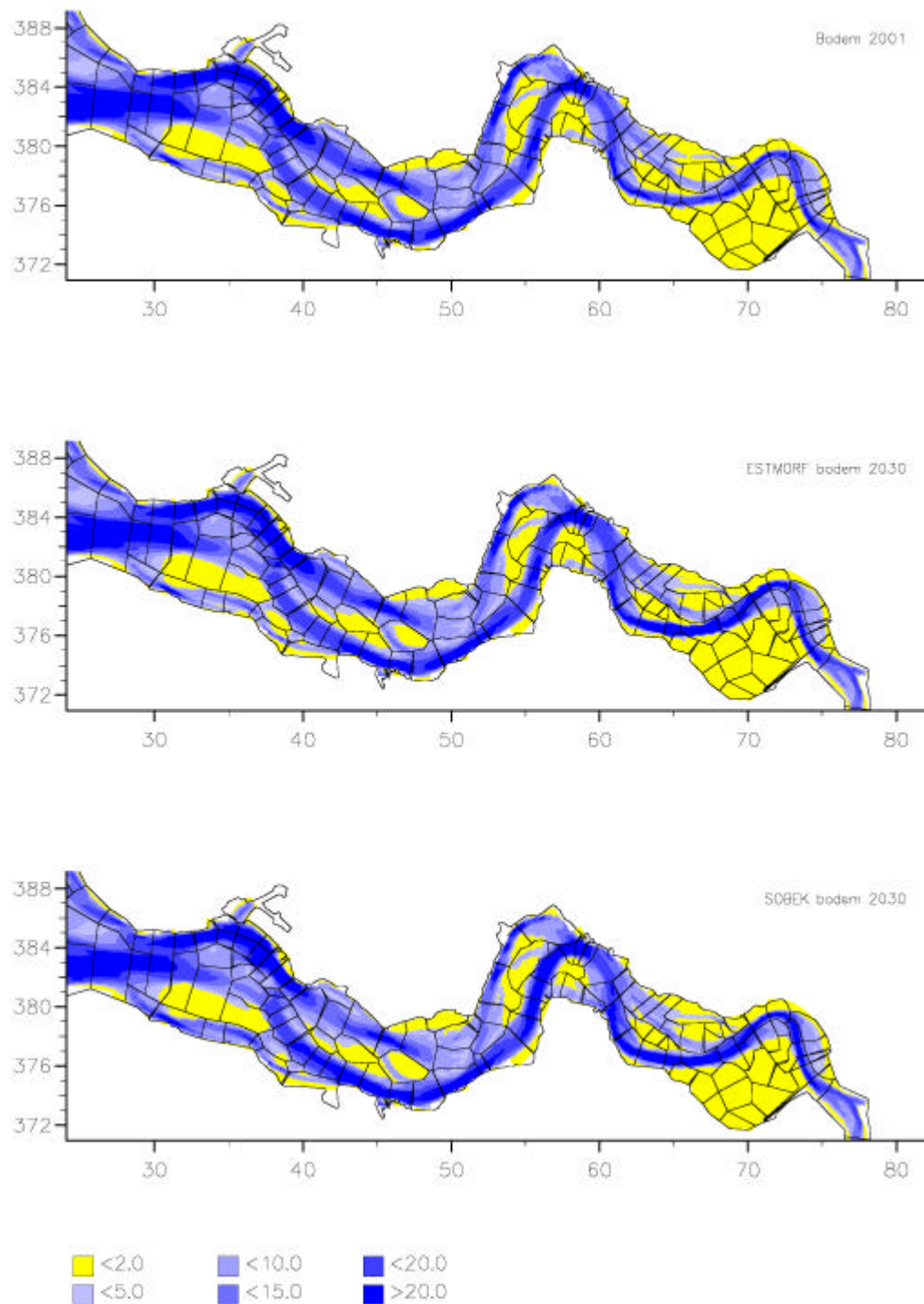
Tot slot moet worden opgemerkt dat de grootte van de voorspelde veranderingen (niet het teken) volgens het SOBEK model waarschijnlijk wat wordt overschat doordat als hydrodynamische randvoorwaarden een gemiddeld springtij is gebruikt.

---

<sup>8</sup> het feit dat de kantelindex in macrocel 4 negatief is wordt veroorzaakt doordat in deze macrocel de vloedgeul de diepste geul is. Dit is de enige macrocel waar sinds 1981 de vloedgeul de vaargeul is en niet de ebgeul.



**Figuur 5-15 historische en voorspelde toekomstige veranderingen in de stabiliteit van de geulen in de macrocellen.**



**Figuur 5-16** Voorspelde bodemligging in het nulalternatief 2030 volgens het ESTMORF model en het SOBEK model. Bovenste figuur is de beginbodem 2001.

## 5.5 De ontwikkeling van de kortsluitgeulen in de mesocellen

### Algemeen

De kortsluitgeulen zijn de relatief kleine geultjes die verbindingen vormen tussen de grote eb- en vloedgeul in een macrocel. Ze doorsnijden daarbij de ondiepe drempelgebieden in het landwaarts gelegen uiteinde van de vloedgeulen. Alleen bochtgroep 3, ter hoogte van Terneuzen, wordt nog gekenmerkt door kortsluitgeulen die de langgerekte intergetijdengebieden tussen de grote geulen doorsnijden en 'omwerken'. In de periode 1900-1970 werden de bochtgroepen 5, het valkenisse-gebied, en bochtgroep 7, nabij de grens ook gekenmerkt door dit type kortsluitgeulen (Jeuken, 2000). Verder komen kortsluitgeulen voor tussen het vaarwater langs Hoofdplaat (mesocellen 2 in Figuur 5-17) en de ebgeul Pas van Terneuzen in macrocel 3. Eb- en vloedgedomineerde kortsluitgeulen vormen samen de zogenaamde meso-cellen uit het cellenconcept.<sup>9</sup>



**Figuur 5-17 Locatie van de macro- en mesocellen (naar Winterwerp et al, 2000, 2001). Een bochtgroep is de samengestelde morfologische eenheid die bestaat uit een macrocel, platen en mesocellen (zie ook Hoofdstuk 2).**

De morfologische dynamiek van de kortsluitgeulen en de instandhouding van de mesocellen kan met het huidige ter beschikking staande modelinstrumentarium niet worden voorspeld. Dit betekent dat op basis van de kantelindex (zie Hoofdstuk 2) en fenomenologische een uitspraak moet worden gedaan over de te verwachten veranderingen in de aanwezigheid van de kortsluitgeulen

### Verandering in de aanwezigheid van kortsluitgeulen

Mesocel 2 bestaat uit het complex van kleine geulen waaronder het vaarwater van Hoofdplaat. Dit kleinschalige geulsysteem wordt al decennia lang gekenmerkt door een geleidelijke sedimentatie (orde  $0.5 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ ). De geleidelijke en langdurige sedimentatie hangt vermoedelijk samen met het verdwijnen van de oude geulen en intergetijdengebieden van de Braakman sinds 1650 en de uiteindelijke inpoldering van dit gebied 1958. Te gelijktijd vond een opbouw plaats van het intergetijdengebied de Hooge Platen, gelegen

<sup>9</sup> Naast dit type mesocellen worden in het cellenconcept op ook enkele mesocellen onderscheiden die niet uit afzonderlijke geulen bestaan maar eerder het gevolg zijn van inscharingen die tot uitdrukking komen in het residuele sediment transportpatroon (bijv. cel 4a-4c, in Figuur 5-17). Dit laatste minder uitgesproken type mesocel wordt in deze studie niet verder beschouwd.

---

tussen macrocel 1 en de mesocellen 2a en 2b. Als gevolg van deze ontwikkelingen is het aantal kortsluitgeulen en dynamiek van de kortsluitgeulen tussen de mesocellen 2 en de ebgeul in macrocel 3 afgenomen.

---

Kijken we naar de voorspelde ontwikkelingen dan voorspeld ESTMORF nagenoeg geen morfologische verandering, terwijl het gebied volgens SOBEK zal gaan eroderen. Geen van beide voorspelde ontwikkelingen is waarschijnlijk juist. Op basis van de historische informatie lijkt het aannemelijk dat de geleidelijke sedimentatie in de mesocellen 2 zich ook de komende jaren-decennia zal voortzetten.

In 2001 worden slechts drie van de zes bochtgroepen gekenmerkt door echte kortsluitgeulen. Het gaat hierbij om de bochtgroepen 1, 3 en 5 en in mindere mate om de macrocellen 4 en 6. De historie en de verwachtingen ten aanzien van de instandhouding van het verschijnsel kortsluitgeulen kunnen als volgt worden getypeerd:

In bochtgroep 1 komen van oudsher kortsluitgeulen voor in het drempelgebied van de grote vloedgeul (mesocel 1a, Figuur 5-17). De geulen vertonen een quasi-cyclisch gedrag op een tijdschaal van een tot enkele decennia. De verdieping van de grote vloedgeul in de periode 1960-1996 (Figuur 4-8) hangt grotendeels samen met het ontstaan, de expansie (tot ca 1980) en de migratie en degeneratie (tot ongeveer 1999) van een grote ebgedomineerde kortsluitgeul. De verondieping van de vloedgeul sinds de tweede verruiming hangt samen met het storten van grote hoeveelheden ( $1.4\text{Mm}^3/\text{jr}$ ) baggerspecie in de sterk degenererende kortsluitgeul uit 1964. Tussen 1990 en 1996 zijn enkele kleine kortsluitgeulen met een korte levensduur aanwezig. Vanaf 1996 ontstaat er weer een wat grotere kortsluitgeul die ook in 2001 prominent aanwezig is en in noordelijke richting migreert. De waargenomen veranderingen in de gemiddelde diepte van de grote vloedgeul en de kanteling van de geulen in de macrocel tussen 1960 en 1996 hangen samen deze veranderingen in de dynamiek van de kortsluitgeulen. Een dergelijke dynamiek kan niet door het modelinstrumentarium worden voorspeld. De vraag is of deze dynamiek in het scenario nulalternatief wezenlijk zal veranderen. De geringe waargenomen en voorspelde diepteveranderingen van de ebgeul, de grote verschillen in lengte tussen de eb- en vloedgeul (die eerder groter dan kleiner worden) en de relatief geringe diepte verschillen tussen de eb- en vloedgeul zullen gepaard gaan met forse verhangen in het drempelgebied van de vloedgeul. Het is daarom niet waarschijnlijk dat het fenomeen kortsluitgeulen in dit gebied verdwijnt. De ebgedomineerde kortsluitgeulen zijn bij uitstek een geschikte locatie voor het storten van onderhoudsspecie. Zeker wanneer de geulen eenmaal expanderen hebben stortingen relatief weinig invloed op dit proces (Jeuken, 2000). Storten zal de degeneratie van een geul wel enigszins versnellen. Dit hoeft niet nadelig te zijn zolang er maar nieuwe geulen kunnen blijven ontstaan.

Ook in het drempelgebied van de vloedgeul van macrocel 3 komen kortsluitgeulen voor (mesocel 3b-3d). De geulen vertonen een morfologisch gedrag dat vergelijkbaar is met dat van de kortsluitgeulen in bochtgroep 1. In deze bochtgroep komen echter ook nog kortsluitgeulen voor die de platen doorsnijden en 'omploegen' (mesocel 3a, Figuur 5-12). Dit type kortsluitgeul (mesocel 3a) interacteert met het type kortsluitgeulen in het drempelgebied (mesocellen b-3d, Jeuken, 2000). De gehele grote vloedgeul zal naar verwachting gaan verondiepen als gevolg van netto storten. Hierdoor zullen dwarsverhangen tussen de grote eb- en vloedgeul kleiner worden waardoor de aanwezigheid en dynamiek van de kortsluitgeulen zal afnemen (zie Hoofdstuk 2). Deze afname komt ook tot uitdrukking als een sedimentatie in de gebieden met kortsluitgeulen in Figuur 5-12, Figuur 5-14 en Figuur 5-16.

In bochtgroep 4 komen eigenlijk geen echte migrerende kortsluitgeulen meer voor sinds de bochtafsnijding van de ebgeul in 1951. Gelet op de voorspelde verdergaande kanteling van



---

de grote eb- en vloedgeul worden voor de toekomst geen wijzigingen in de afwezigheid van kortsluitgeulen verwacht.

Het geulsysteem in bochtgroep 5, het Valkenisse-gebied, leek in de periode 1900-1950 qua morfologie en aanwezigheid van kortsluitgeulen sterk op het huidige geulsysteem van de bochtgroep bij Terneuzen. De natuurlijke kanteling van het geulsysteem richting ebgeul tussen 1931 en 1955 zal gepaard zijn gegaan met een afname van dwarsverhangen die geleid heeft tot een geleidelijke afname van de activiteit van kortsluitgeulen.

---

De bochtafsnijding in het middendeel van de Westerschelde in 1951 zal dit proces vermoedelijk een extra impuls hebben gegeven doordat de aanstroming van de eb- en vloedgeul in het Valkenisse-gebied tijdens vloed veranderde (vloedstroom in de ebgeul nam waarschijnlijk toe ten koste van de vloedgeul) en gepaard ging met een verondieping van de vloedgeul. Deze veranderde aanstroming is waarschijnlijk ook de belangrijkste reden waarom de vloedgeul Schaar van Valkenisse sinds 1960 in zuidwestelijke richting is gemigreerd en geroteerd en waarom de plaatpunt van Walsoorden is geërodeerd. Dit proces is in de periode 1970-1980 vermoedelijk versterkt door netto stortingen ten behoeve van het vaargeulonderhoud tijdens en na de eerste verruiming van de vaargeul. In deze periode zijn kortsluitgeulen afwezig. Halverwege de jaren tachtig is de vloedgeul schaar van Valkenisse zo ver naar het zuidwesten geroteerd en verplaatst dat er een nieuwe kortsluiting tussen eb- en vloedgeul kan ontstaan door ebgedomineerde kortsluitgeultjes met een cyclusduur van enkele jaren. De vloedgeul erodeert, het geulsysteem kantelt tijdelijk richting vloedgeul. Na de tweede verruiming kantelt het geulsysteem weer richting de ebgeul onder invloed van netto baggeren, de activiteit van de kortsluitgeultjes en de erosie van de vloedgeul nemen nog niet zichtbaar af. De vraag is of dit in de toekomst wel gaat gebeuren. De voorspelde diepteveranderingen en kanteling van het geulsysteem is van dezelfde orde van grootte als waargenomen gedurende de periode 1955-1980. Het belangrijkste verschil tussen toen en nu/toekomst is de locatie van de Schaar van Valkenisse. Gezien de vermoedelijke oorzaak en de verwachte ontwikkelingen in het middengebied en de locatie en omvang van de netto stortingen in de Schaar van Waarde is niet waarschijnlijk dat deze geul van nature weer naar het noorden verplaatst. Daarom worden er voor het nulalternatief geen grote wijzigingen in het voorkomen van de kortsluitgeulen in deze bochtgroep verwacht.

In bochtgroep 6 kwamen in de periode 1900-1940 diverse ebgedomineerde kortsluitgeulen voor in het drempelgebied van de vloedgeul. Met de geleidelijke toename van het vaargeulonderhoud en het dieper worden van de ebgeul nam deze activiteit van de kortsluitgeulen af. Tijdens en na de eerste verdieping bereikte de dynamiek ten gevolge van kortsluitgeulen een dieptepunt toen er naast baggeren in de vaargeul ook gestort werd in de vloedgeul. Sinds begin jaren negentig kunnen in het fors verruimde drempelgebied van de vloedgeul weer vage contouren van een kortsluitgeul worden waargenomen. Op basis van de voorspelde geringe kanteling worden in deze situatie geen wezenlijke veranderingen verwacht.

De kortsluitgeulen die in het verleden voorkwamen in bochtgroep 7 zijn met de aanleg van de leidam in 1971 definitief verdwenen.

## **Conclusie**

Op basis van de beschouwingen in de voorgaande paragraaf kan worden geconcludeerd dat alleen in de bochtgroep bij Terneuzen de kortsluitgeulen in aantal en/of omvang zullen afnemen. Deze afname is het gevolg van de algemene verondieping van de vloedgeul die veroorzaakt wordt door het langdurig storten van grote hoeveelheden sediment.

---

## 5.6 De ontwikkeling van het intergetijdengebied

### 5.6.1 Veranderingen van het areaal en volume van de intergetijdengebieden volgens ESTMORF

#### ***Resultaten nulalternatief***

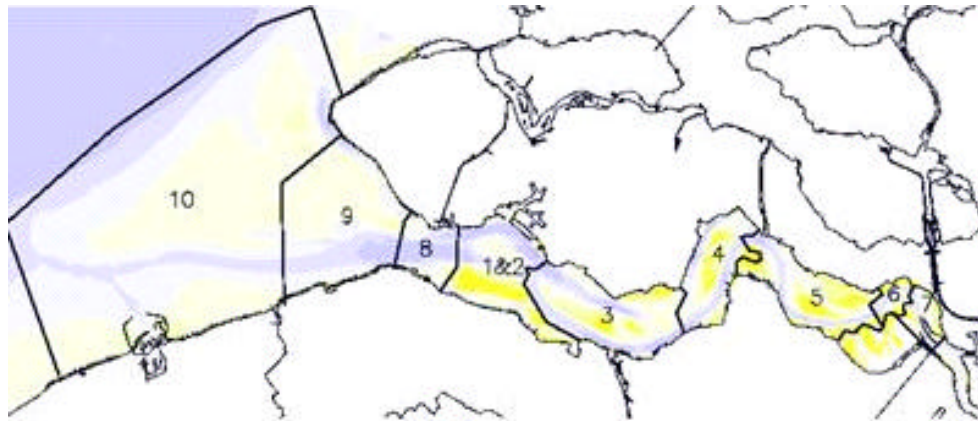
Figuur 5-18 toont de totale veranderingen van het areaal en het volume intergetijdengebied (plaat + slik) voor de periode 2001-2030 voor het nulalternatief en het alternatief zonder ingrepen op basis van ESTMORF. De intergetijdengebieden zijn gedefinieerd als de gebieden gelegen tussen het niveau van NAP-2m en NAP+3.5m. Beschouwen we de ontwikkeling van de intergetijdengebieden in de gehele Westerschelde gedurende de periode 2001-2030 dan is er sprake van een geleidelijke erosie; het volume intergetijdengebied neemt met enkele miljoenen kuubs af (4%). Het areaal intergetijdengebied op NAP-2m neemt met ongeveer 150 ha (2%) af.

Kijken we wat meer in detail (Figuur 5-18), dan blijkt dat in de gebieden 5, 6 en 7 in het oostelijk deel en gebied 3 in het westelijk deel van de Westerschelde het plaatvolume en het plaatareaal afnemen (met ca. 5-10%). In het middendeel, cel 4, neemt het areaal ook af, maar het volume neemt juist toe. Dit betekent dat de platen in dit middendeel van de Westerschelde compacter worden. Helemaal in het westen, in gebied 1 & 2 ter hoogte van Vlissingen, is er sprake van een uitbreiding van het intergetijdengebied.

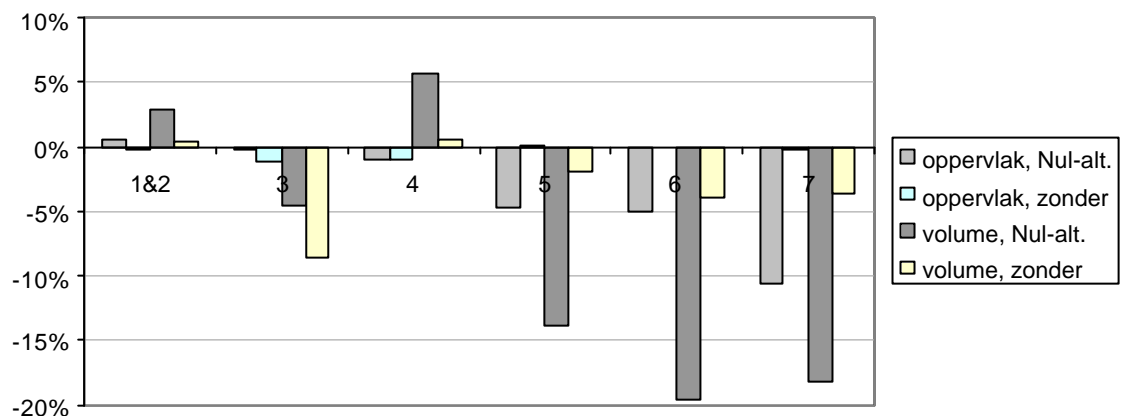
#### ***De invloed van vaargeulonderhoud en zandwinning***

Vergelijken we de respons van de intergetijdengebieden met de morfologische veranderingen volgens de simulatie zonder vaargeulonderhoud en zandwinning, dan kan het volgende worden geconcludeerd (Figuur 5-18):

- De erosie van de intergetijdengebieden wordt sterk beïnvloed door de ingrepen: zonder vaargeulonderhoud en zandwinning zijn de voorspelde veranderingen verwaarloosbaar klein.
- Deze invloed van de ingrepen manifesteert zich vooral in de gebieden 5, 6 en 7 in het oostelijk deel van de Westerschelde.
- In het westelijk deel resulteren vaargeulonderhoud en zandwinning juist in een relatieve sedimentatie / opbouw van de intergetijdengebieden.



**Procentuele verandering areaal en volume IGG , 2001-2030**



**Figuur 5-18 Verandering van de intergetijdengebieden in de Westerschelde gedurende 2001-2030 volgens het Nul-alternatief (Nul-alt.) en volgens een alternatief waarbij er geen vaargeulonderhoud en zandwinning meer plaats vindt (zonder)**

### **Interpretatie**

Wat de ESTMORF modelresultaten laten zien is dat een tekort aan sediment in de geulen, veroorzaakt door netto baggeren, gepaard met een erosie van de intergetijdengebieden in het oostelijk deel. Een overschot aan sediment in de geulen ten gevolge van netto storten gaat gepaard met een sedimenttransport van de geulen naar de aangrenzende platen en slikken waardoor de intergetijdengebieden opbouwen.

De empirische relaties voor de ontwikkeling van de intergetijdengebieden relateren de gemiddelde hoogte van de platen aan het hoogwater niveau. Dit niveau verandert in het nulalternatief weinig. Dit betekent dat de voorspelde ontwikkeling van de intergetijdengebieden wordt vooral gestuurd door de ontwikkelingen van de geulen.

---

### 5.6.2 Discussie en conclusie

De voorspelde ontwikkelingstendensen van de intergetijdengebieden (plaat en slik), op het aggregatieniveau van de waarnemingen (oost, midden en west) levert de volgende toekomstige veranderingen:

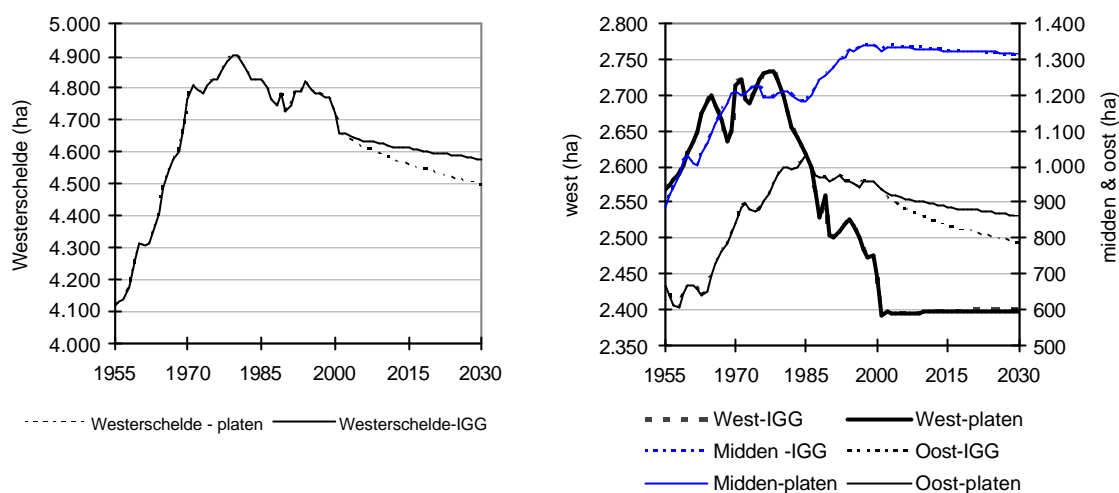
- Verwaarloosbaar kleine veranderingen van het areaal intergetijdengebied in het westelijk deel.
- Een kleine afname van het areaal intergetijdengebied in het middendeel.
- Een algemene erosie van de intergetijdengebieden (areaal, volume) in het oostelijk deel die duidelijk wordt beïnvloed door de sturende invloed van het netto baggeren in de geulen.

Om een vergelijking te kunnen maken met de waargenomen ontwikkelingen moet in de voorspelde ontwikkeling van het intergetijdengebied een onderscheid worden gemaakt tussen plaat en slik omdat de waarnemingen betrekking hebben op het areaal plaat (zie Hoofdstuk 4). Dit is gedaan door aan te nemen dat de verhouding tussen het areaal plaat en slik zoals dat in 2001 aanwezig was niet verandert. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5-19 samen met de waarnemingen. De stippellijnen geven de ontwikkelingen waarbij de voorspelde verandering van het areaal intergetijdengebied volledig wordt toegekend aan de platen. Vooral voor het oostelijke deel resulteert dit in een realistische marge in de voorspelde ontwikkeling van de platen omdat een groot deel van de geul-slik overgangen in de macrocellen 5, 6 en 7 is gefixeerd door geulwandverdedigingen en/of veenlagen, waardoor het areaal slik weinig tot niet kan veranderen (De Jong, pers. com.). Vergelijken we de op deze wijze voorspelde ontwikkelingen in het areaal plaat met de historische referentie dan impliceert dit (Figuur 5-19):

Een verandering in de ontwikkelingstendens in het westelijk deel waar de afname van het areaal intergetijdengebied (plaat) sinds 1978 (18% in 30 jaar tijd) in de toekomst weinig verandert. De waargenomen afname houdt echter sterk verband met de aanwezigheid en dynamiek van kortsluitgeulen in gebied 3. Deze dynamiek en veranderingen daarin kunnen niet door 1D-netwerkmodellen worden gesimuleerd, waardoor de onzekerheden in de voorspelde ontwikkeling van het areaal plaat groot zijn. In paragraaf 5.5 is aangegeven dat deze dynamiek van kortsluitgeulen vermoedelijk zal afnemen. Dit kan een impuls voor de opbouw van platen betekenen waardoor de afname van het areaal plaat zoals die afgelopen twee decennia is opgetreden afneemt en mogelijk verandert in een stabiele weinig veranderende situatie. De voorspelde ontwikkeling is waarschijnlijk een bovengrens.

In het midden deel verandert het areaal plaat sinds 1995 weinig, dit sluit aan bij de geringe voorspelde veranderingen voor de toekomst. De historische lange termijn trend wordt echter gekenmerkt door een toename van het areaal plaat van ongeveer 22% in dertig jaar tijd, die vermoedelijk samenhangt met de kanteling van geulsysteem (bochtafsnijding). De voorspelde ontwikkeling ten aanzien van de grote geulen duiden op een verdere kanteling van het geulsysteem naar de vloedgeul (vaargeul). Dit zou een verdere opbouw van de platen kunnen betekenen. De onzekerheid over de ontwikkeling van het intergetijdengebied in het midden deel is dus groot en niet goed te kwantificeren.

In het oostelijk deel is er sprake van een afname van het plaat areaal sinds 1978, van orde 10% in dertig jaar. Volgens de resultaten van het nulalternatief zal deze trend zich enigszins verzwakt voortzetten.

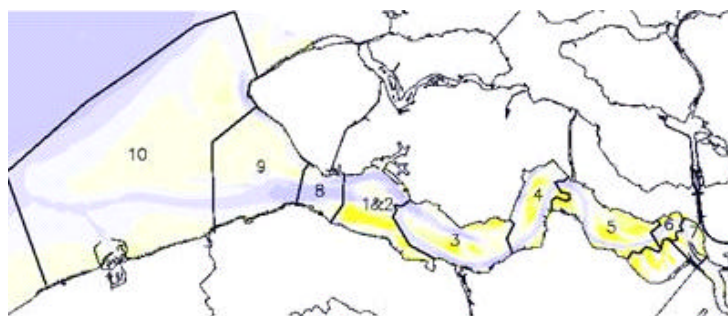


**Figuur 5-19 Waargenomen en voorspelde ontwikkelingen in het areaal plaat in het westelijke, midden en oostelijk van de Westerschelde. Het westelijk deel omvat de gebieden 1 & 2 en 3, het middendeel bestaat uit gebied 4, het oostelijk deel bestaat uit gebied 5, 6 en 7 (zonder Saeftinghe). Alle arealen zijn gedefinieerd als de gebieden tussen NAP-2m en NAP+3.5 (zie ook Hoofdstuk 2).**

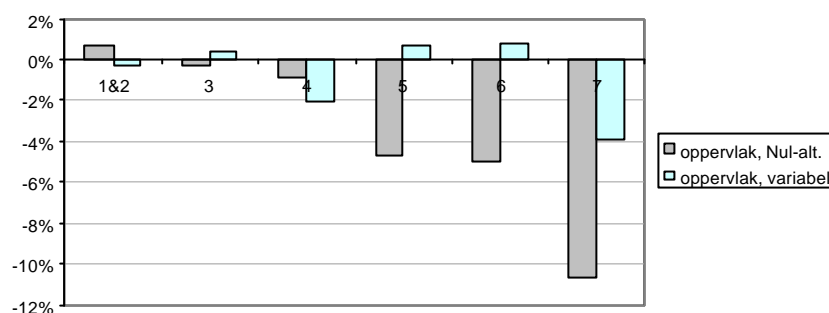
Tot slot moeten twee meer algemene kanttekeningen bij deze voorspelde ontwikkelingen worden geplaatst:

De gehanteerde definitie van intergetijdengebieden is strikt genomen niet juist. Dit gebied is in het verleden vanuit het praktische oogpunt van gegevensanalyse gedefinieerd als het gebied tussen NAP-2m en NAP+2m of NAP+3,5m. Een realistischer definitie relateert het areaal intergetijdengebied aan het niveau van gemiddeld laagwater en hoogwater, een niveau dat in de ruimte en tijd varieert. Om te resultaten van het nulalternatief te kunnen vergelijken met de waarnemingen zijn de berekende areaalveranderingen ook bepaald tussen NAP-2m en NAP+3,5m. Figuur 5-20 laat zien dat de areaalbepaling gevoelig is voor de gehanteerde definitie voor het intergetijdengebied.

In de berekeningen wordt zeespiegelstijging niet expliciet gemodelleerd. Een versnelde zeespiegelstijging van de veronderstelde 20cm/eeuw naar 40 of 60 cm/ eeuw zal gepaard gaan met een verlies van het areaal intergetijdengebied.



Procentuele verandering areaal en volume IGG, 2001-2030



**Figuur 5-20 De invloed van de definitie van intergetijdengebied op de areaalbepaling. Nul-alt is met vaste referentievlakken op NAP-2m en NAP+3.5m t.b.v. de vergelijking met de historische gegevens. Variabel is volgens de juiste definitie met laagwater en hoogwater als referentievlak.**

## 5.7 De ontwikkeling van het ondiepwatergebied

### 5.7.1 Resultaten volgens het ESTMORF model

De veranderingen van het areaal ondiepwatergebied wordt niet expliciet gemodelleerd in ESTMORF. Indicatieve veranderingen van het areaal ondiepwatergebied worden bepaald door de ESTMORF model resultaten te vertalen naar het rooster van het DELFT3D model (zie ook Hoofdstuk 3). Dit is gedaan voor de ESTMORF bodem van 2030 voor het nulalternatief en het alternatief zonder ingrepen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5-21.

Het totale areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde neemt in dertig jaar tijd met ongeveer 60 ha (2%) af. Kijken we naar de ruimtelijke variatie in het areaal ondiepwatergebied dan neemt dit gebied in de drie bochtgroepen 5, 6 en 7 in het oostelijk deel af (ca 140 ha, 13 %). De afname is relatief groot in gebied 6 (70%), hier is het areaal ondiep water gebied in 2001 echter al klein (orde 90 ha.). In het midden deel, gebied 4 treden kleine veranderingen in het areaal ondiep water gebied op. In het westelijk deel is sprake van een geringe toename van het areaal ondiep watergebied (5%, orde 80 ha).

Vergelijken we deze tendensen volgens Figuur 5-21 met een kwalitatief overzicht van de belangrijkste ontwikkelingen van de geulen en de intergetijdengebieden (Tabel 5-2) dan kan worden geconcludeerd dat de veranderingen van het ondiepwater areaal vooral

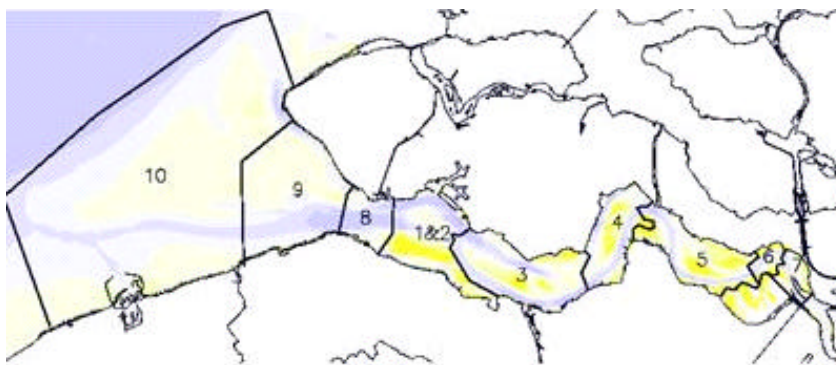
---

samenhangen met het netto verdiepen of verondiepen van de grote eb- en vloedgeul in de macrocellen en in mindere mate samenhangen met de veranderingen van de intergetijdengebieden.

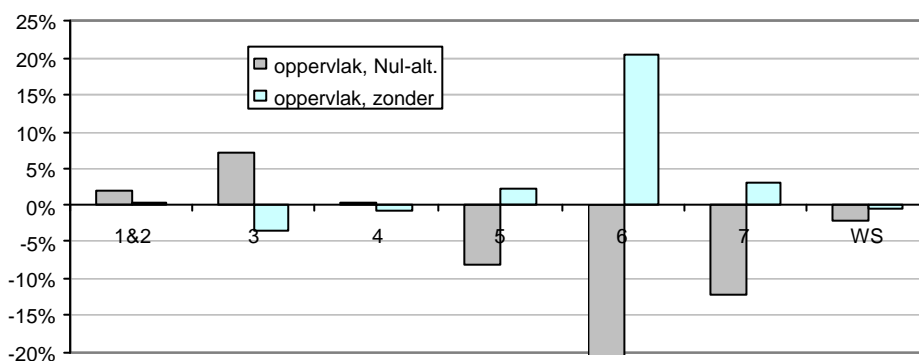


Dit is tot op zekere hoogte logisch omdat het ondiepwatergebied deel uit maakt van de geulen. De methode waarmee de ESTMORF bodem veranderingen zijn vertaald naar het DELFT3D-rooster (bijlage C) zal ook van invloed op zijn op de voorspelde indicatieve veranderingen.

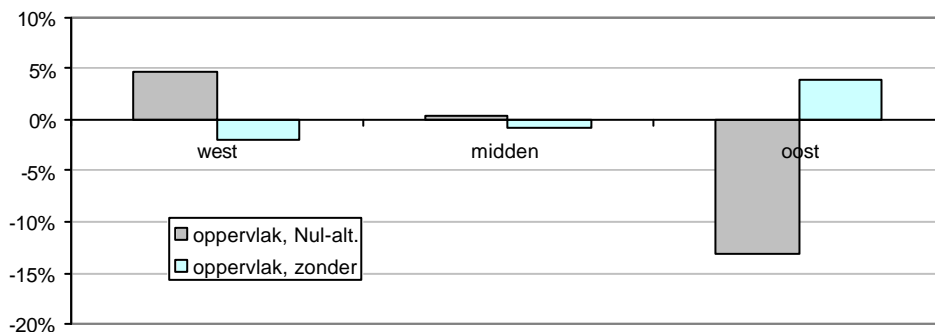
Vergelijken we, tot slot, de verschillen tussen het nulalternatief en het alternatief zonder ingrepen dan kan worden geconcludeerd dat de ingrepen sturend zijn in de gesimuleerde veranderingen van de geulen en dus het ondiepwatergebied.



Procentuele verandering areaal OG , 2001-2030



Verandering areaal OG , 2001-2030



**Figuur 5-21** Indicatie van de verandering van het areaal ondiep watergebied op basis van een vertaling van de bodemveranderingen 2001-2030 volgens het ESTMORF nulalternatief en het alternatief zonder ingrepen naar het DELFT3D-rooster.

**Tabel 5-2 Veranderingen in het areaal ondiepwatergebied (OG) en de samenhang met de morfologische ontwikkeling van de geulen en de intergetijdengebieden (IGG). + = toename, - afname.**

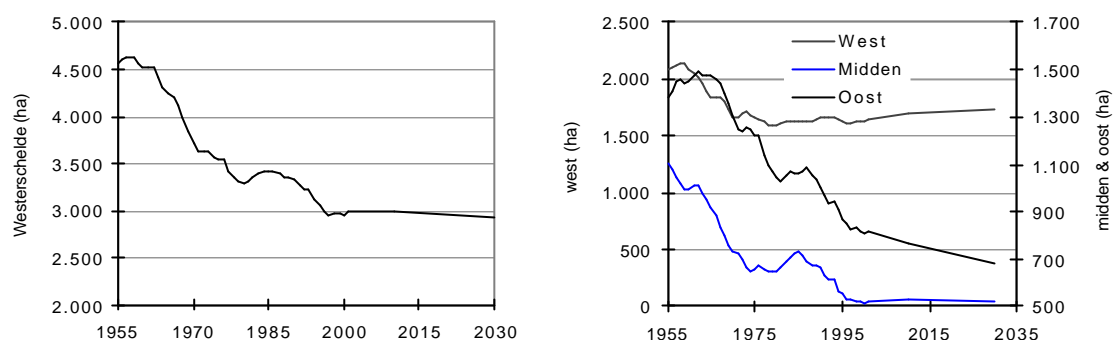
Morfologisch proces	West			Midde n	Oost			
	totaal	1 & 2	3	4	totaal	5	6	7
Diepte ebgeul	0	-	+	-	+	+	+	+
Diepte vloedgeul	-	0	-	+	+	0	+	+
Richting kanteling	EG	-	EG	VG	EG	EG	EG	-
Kortsluitgeulen	-	0	-	n.v.t.	0	0	0	n.v.t.
Areaal IGG	0	+	-	-	-	-	-	-
Hoogte IGG	0	+	-	+	-	-	-	-
Areaal OG	+	+	+	0	-	-	-	-

### 5.7.2 Discussie en conclusie

In het nulalternatief verandert het totale areaal ondiepwatergebied in de gehele Westerschelde vermoedelijk weinig gedurende de periode 2001-2030. Kijken we naar de drie deelgebieden oost, midden en west, en vergelijken we dit met de historische referentie (Figuur 5-22), dan impliceert het nulalternatief de volgende ontwikkelingstendensen:

- Een afname van het areaal ondiepwatergebied in het oostelijk deel (orde 140ha in 30 jaar). Dit betekent een voortzetting en afzwakking van de waargenomen erosieve trend (370 ha in 30 jaar).
- Een weinig veranderend areaal ondiep watergebied in het midden deel. De waargenomen erosie van de afgelopen decennia verandert in een meer stabiele situatie. Dit lijkt een reële situatie omdat het verdwijnen van het ondiepwatergebied in het verleden vooral samenhang met een erosie van de vloedgeul en het compacter worden van de intergetijdengebieden door het opvullen van kleine geultjes. Deze morfologisch processen gaan nog wel door in de toekomst, maar zullen weinig extra veranderingen in het areaal ondiepwatergebied veroorzaken (de geultjes zijn al opgevuld). De verwachte sedimentatie in de ebgeul zou lokaal gepaard kunnen gaan met een uitbreiding van het areaal ondiepwatergebied.
- In het westelijk deel neemt het areaal ondiep watergebied iets toe (orde 5%). Dit is geen wezenlijke verandering van de waargenomen stabiele situatie van de afgelopen 20 jaar. De verwachte verondieping in de vloedgeul van gebied 3 zal gepaard gaan met een vermindering van het aantal en de omvang de kortsluitgeulen. Dit kan op een termijn van 1 tot enkele decennia een uitbreiding van het areaal ondiep watergebied betekenen omdat de meeste van deze geulen dieper dan vijf meter zijn.

Tot slot moet worden opgemerkt dat de onzekerheden in deze voorspelde veranderingen vrij groot zijn. Daarom moeten de resultaten worden beschouwd als een indicatie van de toekomstige ontwikkeling.



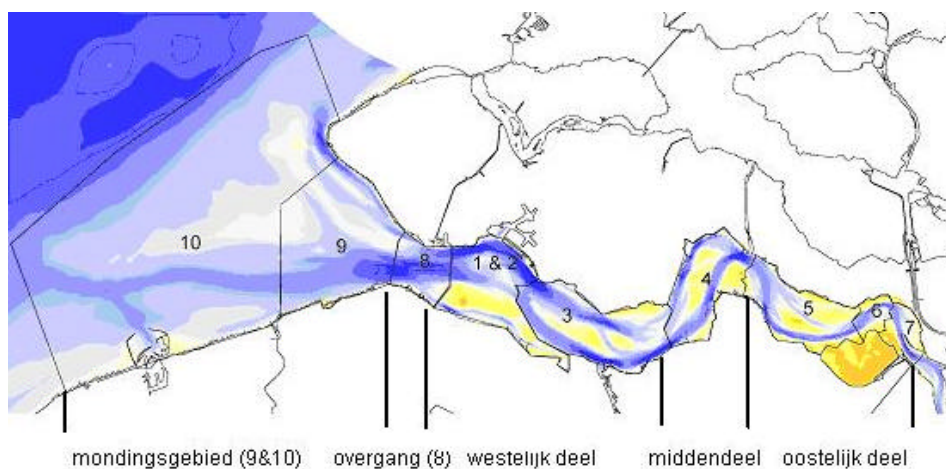
***Figuur 5-22 Historische ontwikkeling en indicatieve voorspelde veranderingen van het areaal ondiepwatergebied.***

## 5.8 Discussie en conclusies

### 5.8.1 Inleiding

Het morfologisch onderzoek voor het nulalternatief moet antwoord geven op de vraag of en in hoeverre bij rigide voortzetting van het huidige beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning de randvoorwaarden voor het instandhouden van het meergeulensysteem (Hoofdstuk 1) gewaarborgd zijn. Deze instandhoudingdoelstelling is vertaald naar de onderzoeksvragen 1 t/m 4 (paragraaf 1.2) en een set indicatoren om de vragen te beantwoorden (Hoofdstuk 2).

In de voorgaande paragrafen zijn de antwoorden op deze vragen bepaald aan de hand van de resultaten van het ESTMORF model en het SOBEK model en vergeleken met de historische ontwikkelingstendensen zoals beschreven in Hoofdstuk 4. Bij deze vergelijking is nagegaan of tendensen in de morfologische ontwikkeling uit het verleden zich voortzetten, versterken of verzwakken, of juist veranderen. De belangrijkste resultaten worden in paragraaf 5.8.2 samengevat, waarna in paragraaf 5.8.4 de conclusies met betrekking tot de instandhoudingdoelstelling voor het meergeulensysteem in het nulalternatief volgen. Het kaartje met de geografische aanduidingen uit Hoofdstuk 2 is ter ondersteuning opgenomen als Figuur 5-23.



---

***Figuur 5-23. Geografische aanduiding van gebieden. Het meergeulensysteem in de Westerschelde omvat de gebieden 1 t/m 7.***

#### **5.8.2 Toekomstige veranderingen van het morfologisch systeem**

##### ***Veranderingen in de zandhuishouding (vraag 1)***

De vergelijking van de berekende toekomstige ontwikkelingen in de zandbalans met de historische referentie laat zien dat er in het nulalternatief sprake is van een voortzetting van de ontwikkelingstendensen zoals waargenomen sinds ongeveer 1990:

- De Westerschelde als geheel verruimt met enkele miljoenen kuubs per jaar en exporteert ongeveer 1 miljoen kubiek meter zand naar het mondingsgebied. Het is nog onduidelijk of het zand in het mondingsgebied zal blijven liggen (sedimentbuffer?).

- Het vaargeulonderhoud en de zandwinning bepalen de netto erosie en sedimentatie in de meeste deelgebieden van de Westerschelde:
  - Het oostelijk deel, van Hansweert tot de grens, erodeert als gevolg van baggeren,
  - Het midden deel, nabij Hansweert, erodeert van nature ondanks het netto storten van sediment.
  - Het westelijk deel, tussen Vlissingen en de hoek van Baarland, verondiept als gevolg van het netto storten van sediment. Tot circa 2000 erodeerde dit gebied onder invloed van netto baggeren.

Deze ontwikkelingen gaan gepaard met een landwaarts gericht zandtransport naar het oostelijk deel, vooral ter hoogte van Hansweert, en zeewaarts gerichte transporten in het westelijk deel van de Westerschelde.

### ***Veranderingen in de stabiliteit van de geulen in de Westerschelde (vraag 2)***

Een vergelijking van de berekende toekomstige veranderingen in de stabiliteit van de geulsystemen in de macrocellen laat zien dat er in het nulalternatief sprake is van een voortzetting en versterking van de waargenomen kanteling van het geulsysteem in het oostelijk en midden deel van de Westerschelde. Voor macrocel 3 nabij Terneuzen, levert het nulalternatief een afwijkend beeld op in die zin, dat de vloedgeul historisch gezien wordt gekenmerkt door erosie, terwijl er in het nulalternatief een omslag optreedt waarbij de geul gaat verondiepen. Dit is op de beschouwde tijdschaal van dertig jaar een zichzelf versterkend proces, wat duidt op een instabiele situatie.

Dit betekent dat de geulsystemen in de meeste macrocellen, behalve in cel 1 (nabij Vlissingen) en 7 (nabij de grens), kantelen richting de vaargeul als gevolg van:

- baggeren in de vaargeul (macrocellen 5 en 6),
- storten in de vloedgeul (macrocel 3),
- natuurlijke erosie in de vloedgeul (vaargeul) en storten in de ebgeul (nevengeul) (macrocel 4).

Voor het kantelen van de geulen in de macrocellen 3 en 4 kunnen een potentiële bedreiging vormen voor de instandhouding van het huidige meergeulensysteem. De geulen degenereren niet op een tijdschaal van dertig jaar maar het  *karakter* van de geulsystemen verandert wel: van een systeem van min of meer even grote geulen ontstaat er in de macrocellen een systeem waarbij een van beide geulen duidelijk ondieper wordt dan de andere geul. In macrocel 4, in het middendeel van de Westerschelde, is dit decennia lang (tot halverwege de jaren tachtig) een natuurlijk proces geweest. Het gewijzigde stortbeleid sinds de tweede verdieping van de vaargeul in 1997/1998, heeft een nieuwe impuls aan dit kantelingproces gegeven die zich volgens de berekeningen voortzet. De kanteling van het geulsysteem in macrocel 3 wordt veroorzaakt door netto storten van (te) grote hoeveelheden baggerspecie in de vloedgeul ( $2.7 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ ). Dit kan op een termijn van enkele decennia leiden tot een verandering van het karakter van de bochtgroep die vergelijkbaar is met de historische veranderingen die in bochtgroep 5, het Valkenisse-gebied, zijn opgetreden sinds 1900. Dit betekent tevens een geleidelijke afname van het aantal en/of omvang van de kortsluitgeulen (mesocellen) in bochtgroep 3.

Een ander denkbaar neveneffect zou zich kunnen manifesteren in een relatieve opbouw van het areaal slik en schor nabij Ellewoutsdijk en een geringe toename van het areaal ondiep watergebied.

---

Hoewel een invloed van de netwerkschematisatie op de voorspelde ontwikkeling in cel 4 niet is uit te sluiten, kan de voorspelde tendens van geulontwikkeling en kanteling wel als realistisch worden beschouwd. Verder wordt de grootte van de voorspelde veranderingen waarschijnlijk wat overschat door het gebruik van een springtij als hydrodynamische randvoorwaarde in het SOBEK model.

---

### ***Veranderingen in het areaal intergetijdengebied (vraag 3)***

De voorspelde veranderingen in het areaal intergetijdengebied (plaat + slik) zijn vertaald naar veranderingen in het areaal plaat om een vergelijking met de historische gegevens te kunnen maken. Een vergelijking van deze toekomstige ontwikkelingen in het areaal platen met de historische referentie voor het oostelijke, midden en westelijk deel<sup>10</sup> laat zien dat sommige tendensen uit het verleden in de toekomst worden voortgezet, en sommige tendensen juist veranderen:

- Voor de Westerschelde als geheel neemt het areaal plaat met 80-150 ha af tussen 2001 en 2030. Dit betekent een verzwakte voortzetting van de historische ontwikkelingen sinds 1975.
- De toekomstige afname manifesteert zich in het oostelijk deel als gevolg van het netto baggeren. Dit betekent in dit deel een voortzetting van de ontwikkelingstendens sinds ongeveer 1980.
- De sinds 1978 waargenomen afname van het areaal intergetijdengebieden in het westelijk deel (18% in 30 jaar) verandert in de toekomst mogelijk in een situatie waarbij het areaal plaat weinig verandert.
- In het middendeel verandert het areaal plaat sinds 1995 weinig. De opgetreden lange termijn trend wordt echter gekenmerkt door een toename van het areaal plaat van ongeveer 22% in dertig jaar tijd, die vermoedelijk samenhangt met de kanteling van geulsysteem (bochtafsnijding). De voorspelde ontwikkeling voor de periode 2001-2030 duidt op verwaarloosbaar kleine afname van het areaal intergetijdengebied. Dus een voortzetting van de ontwikkelingstendens sinds de tweede verdieping.

Een vergelijking van het nulalternatief en een alternatief zonder vaargeulonderhoud en zandwinning laat zien dat de voorspelde veranderingen van het areaal intergetijdengebied sterk worden beïnvloed door baggeren en storten.

Verder is de definitie van het intergetijdengebied tussen NAP-2m en NAP+3,5m een benadering van het werkelijke intergetijdengebied (zie ook Hoofdstuk 2). Deze definitie is echter gebruikt om de voorspelde ontwikkelingstendensen te kunnen vergelijken met de historische referentie zoals die in eerdere studies is bepaald. De voorspelde ontwikkeling van het areaal intergetijdengebied blijkt erg gevoelig te zijn voor de gehanteerde definitie.

### ***Veranderingen in het areaal ondiepwatergebied (vraag 4)***

De toekomstige ontwikkelingen van het areaal ondiepwatergebied tot 2030 kunnen als volgt worden getypeerd:

- In het nulalternatief neemt het totale areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde als geheel vermoedelijk met enkele procenten af gedurende de periode 2001-2030.
- In het westelijk deel neemt het areaal ondiepwatergebied iets toe (orde 5%). Dit is geen wezenlijke verandering van de waargenomen stabiele situatie van de afgelopen 20 jaar.
- De historische afname van het areaal ondiepwatergebied in het middendeel stabiliseert zich in de toekomst.
- Het areaal ondiepwatergebied in het oostelijk deel neemt af (circa 140 ha in 30 jaar) als gevolg van een erosie van de geulen door netto baggeren. Dit betekent een voortzetting en afzwakking van de waargenomen trend van afname van het areaal ondiep watergebied (370 ha in 30 jaar).

---

<sup>10</sup> De historische gegevens zijn niet beschikbaar op de ruimteschaal van bochtgroepen. Daarom zijn de voorspelde ontwikkelingen per bochtgroep geaggregeerd naar oost, midden en west.

---

Een vergelijking van het nulalternatief en een alternatief zonder vaargeulonderhoud en zandwinning laat zien dat de voorspelde veranderingen van de arealen intergetijdengebied en ondiepwatergebied sterk worden beïnvloed door baggeren en storten.

### 5.8.3 Onzekerheden

De voorspelde ontwikkelingen worden gekenmerkt door onzekerheden. Om een kwalitatief beeld te krijgen van de onzekerheden zijn de resultaten van het ESTMORF model en het SOBEK model voor de zandhuishouding en de stabiliteit van het geulsysteem met elkaar vergeleken. Hieruit kan worden geconcludeerd dat:

- De onzekerheden in de zandhuishouding kleiner zijn dan de onzekerheden in de voorspelde veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem.
- Bij de voorspelde veranderingen in de zandhouding zijn de onzekerheden in de voorspelde volumeveranderingen kleiner dan in de afgeleide zandtransporten.
- Bij de voorspelde veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem zijn de onzekerheden in de kantelingindex kleiner dan in de voorspelde diepte van de individuele geulen (Tanczos et al., 2004).

Voor het areaal intergetijdengebied en het areaal ondiepwatergebied is het niet zinvol om de resultaten van ESTMORF en SOBEK met elkaar te vergelijken (zie modelbeschrijvingen in Hoofdstuk 3). De onzekerheden in de voorspelde ontwikkelingen van deze arealen zijn waarschijnlijk groot, maar moeilijk te kwantificeren. Hiervoor zijn verschillende oorzaken aan te wijzen. Een van de belangrijkste oorzaken is dat onze huidige kennis over plaat-geul interacties nog vrij beperkt is. Dit betekent dat we de historische ontwikkelingen in de areaalveranderingen wel kunnen kwantificeren en eventueel kunnen correleren met andere morfologische en/of hydrodynamische processen en karakteristieken, maar lang niet altijd fysisch kunnen begrijpen en dus modelleren.

Uit historische waarnemingen (zie Hoofdstuk 4) blijkt dat het gedrag van (migrerende) kortsluitgeulen invloed kan hebben op de sedimentuitwisseling tussen bochtgroepen (zandhuishouding), de stabiliteit van de geulen in de macrocellen en de locale ontwikkeling van de intergetijdengebieden (plaat en slik). Het gedrag van deze geulen kan met de huidige beschikbare onderzoeksmiddelen niet worden voorspeld. Dit brengt onzekerheden in de resultaten met zich mee die op dit moment nog niet te kwantificeren zijn. Bij het vergelijken van de voorspelde en waargenomen morfologische ontwikkelingen is op kwalitatieve wijze aandacht besteed aan de invloed van het fenomeen kortsluitgeulen.

Tot slot is in de voorspellingen is geen rekening gehouden met een eventuele versnelde zeespiegelstijging. Een versnelling van de zeespiegelstijging naar 40 of eventueel 60 cm/eeuw zal gepaard gaan met een relatieve erosie van het areaal intergetijdengebied en ook de zandhuishouding van het systeem beïnvloeden (Kemerink, 2004). Zeespiegelstijging heeft weinig invloed op de stabiliteit van het geulsysteem (Wang et al., 2002).



---

#### 5.8.4 De instandhouding van het meergeulensysteem

De beantwoording van de onderzoeksvragen, zoals samengevat in paragraaf 5.8.2, brengt een aantal potentiële knelpunten naar voren in de toekomstige morfologische ontwikkelingen voor het referentie/nulalternatief:

1. Een erosie van de Westerschelde en een langdurige trend van sedimentexport. Het oostelijk deel van het meergeulensysteem erodeert als gevolg van netto baggeren. Het westelijk deel verondiept als gevolg van netto storten (vraag 1, zandhuishouding).
2. Een (verdergaande) verandering in de stabiliteit van de geulsystemen in de macrocellen 3 (nabij Terneuzen) en 4 (nabij Hansweert): het geulsysteem bij Terneuzen kantelt fors onder invloed van netto storten in de vloedgeul. Hierbij lijkt sprake te zijn van een zichzelf versterkend proces (vraag 2).
3. Een voortgaande afname van het areaal intergetijdengebied in de Westerschelde, die zich vooral manifesteert in het oostelijk deel van de Westerschelde (vraag 3).
4. Een verdere afname van het areaal ondiepwatergebied in het oostelijk deel en de Westerschelde als geheel doordat het geulsysteem in het oostelijk deel fors verruimt (vraag 4).

De veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem duiden op een verandering van het karakter van het geulsysteem in macrocel 3: de eb- en vloedgeul worden minder gelijkwaardig van omvang en de aanwezigheid/activiteit van kortsluitgeulen vermindert. Dit suggereert een uitbreiding van het waargenomen geprononceerde kantelingproces in zeewaartse richting.

Om de ongewenste ontwikkelingen in het nulalternatief tegen te gaan zijn mitigerende maatregelen waarschijnlijk mogelijk:

Wijziging in het beleid van vaargeulonderhoud en zandwinning kan bijdragen aan een evenwichtiger zandhuishouding. De voorspellingen volgens het (niet realistische) alternatief zonder ingrepen, een soort autonome ontwikkeling, suggereren echter dat de richting van grootschalige sedimenttransportpatronen, waaronder de export, moeilijk te veranderen is.

De verandering van het karakter van het geulsysteem kan worden beïnvloed/tegengegaan door een verandering in de stortstrategie en eventueel de baggerstrategie. Dit geldt zeker voor het geulsysteem nabij Terneuzen en waarschijnlijk ook voor het Hansweert gebied.

Maatregelen tegen een verdere afname van het areaal intergetijdengebied en ondiepwatergebied kunnen zich eveneens richten op de bagger- en stortstrategie, waaronder het storten op de plaatpunt van Walsoorden, en uitpolderingsmaatregelen.

Tot slot wordt opgemerkt dat in de berekende voorspellingen alleen van een rigide strategie voor vaargeulonderhoud en zandwinning kan worden uitgegaan. Dat betekent dat de strategie zoals gespecificeerd in Tabel 5-1 in de berekeningen dertig jaar wordt vastgehouden. In de praktijk wordt een flexibele strategie gehanteerd waarbij ingespeeld kan worden op opgetreden morfologische veranderingen.

---

## 6 Morfologische effecten van uitpolderingen langs de Westerschelde

### 6.1 Inleiding

In de Ontwikkelingsschets 2010 Schelde-estuarium zullen ook maatregelen en projecten worden opgenomen die een eerste concrete bijdrage kunnen leveren aan het bereiken van het streefbeeld voor natuurlijkheid uit de LTV 2030. Hierbij wordt gedacht aan twee typen maatregelen (zie Kennisgeving, 2003):

1. Procesgerichte herstelmaatregelen waarbij een ruimtelijke uitbreiding van het estuarium wordt gerealiseerd door:
  - dijken landwaarts te verplaatsen;
  - buitendijkse opgehoogde gebieden af te graven;
  - gecontroleerde overstromingsgebieden onder gereduceerd getij in te richten;
  - binnendijkse gebieden als wetlands in te richten.
2. Habitatgerichte maatregelen, waaronder:
  - de aanleg van kribben;
  - het afgraven van oud schor, en
  - het verdiepen of verondiepen van geulen.

In het S-MER twee worden twee pakketten van natuurmaatregelen, pakketten A en B, bestudeerd waarin habitat en procesgerichte maatregelen worden gecombineerd. De twee pakketten verschillen onderling vooral in de omvang en locatie van de procesgerichte maatregelen: Pakket A bevat een klein aantal grootschalige maatregelen voor natuurontwikkeling, die meer ruimte geven aan het estuarium o.a. door uitpolderen. Pakket B bevat een groot aantal kleinschaliger maatregelen.

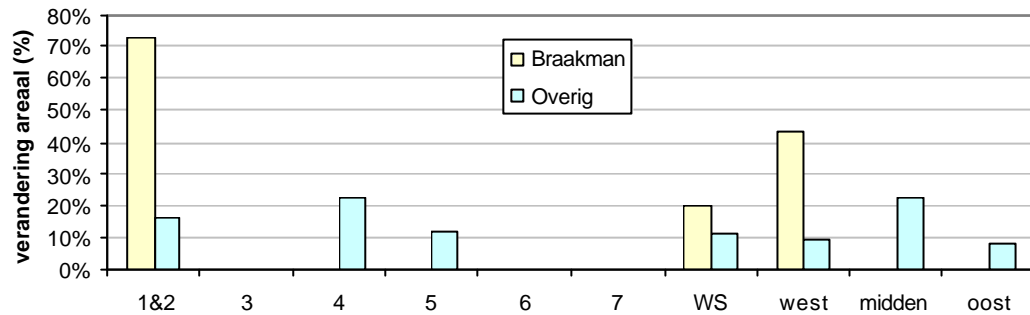
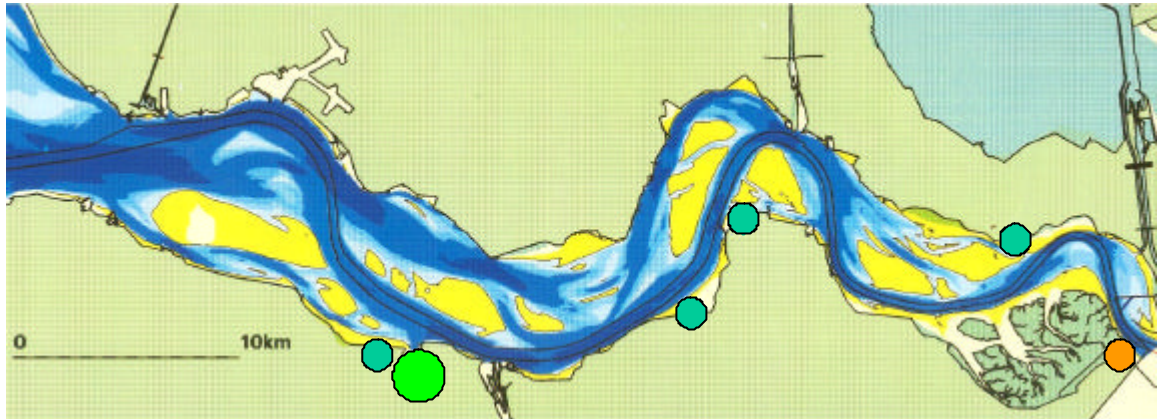
### 6.2 Voorbeeldmaatregelen in het morfologisch onderzoek

Binnen het morfologisch onderzoek worden twee procesgerichte voorbeeldmaatregelen in de Westerschelde bestudeerd (zie Figuur 6-1 a en b):

1. grootschalig uitpolderen van de Braakman (ca 2000 ha) als onderdeel van pakket A, en,
2. een combinatie van meerdere kleinschalige uitpolderingen die elk minder dan 250 ha groot zijn, als onderdeel van pakket B.

Om de morfologische respons ten gevolge van uitpolderingen te kunnen voorspellen wordt gebruik gemaakt van het ESTMORF model. Om de berekeningen te kunnen uitvoeren is de schematisatie van het ESTMORF model aangepast. Hierbij zijn de profielen van de ESTMORF vakken die aan uitpolderingen grenzen aangepast. Er zijn dus geen nieuwe vakken/takken in het model gedefinieerd. De basis informatie die nodig was voor het aanpassen van de profielen bestond uit kombergingsgrafieken van de uit te polderen gebieden. Deze zijn door het Rijksinstituut voor Kust en Zee in Middelburg bepaald en vervolgens aan WL geleverd.

De opzet van de berekening is verder identiek aan het nulalternatief (zie paragraaf 5.2), zodat de resultaten met elkaar kunnen worden vergeleken (relatieve effectbepaling).



**Figuur 6-1 Uitpolderingsvarianten Westerschelde. a) Overzicht van de globale locatie van de voorbeeldmaatregelen uitpolderingen langs de Westerschelde. Licht groen= Braakman, donkergroen =combinatie van overige uitpolderingen, oranje = Hedwige Prosper Doel, hieraan wordt niet gerekend. b) Initiële verandering in het areaal intergetijdengebied ten gevolge van de uitpoldering.**

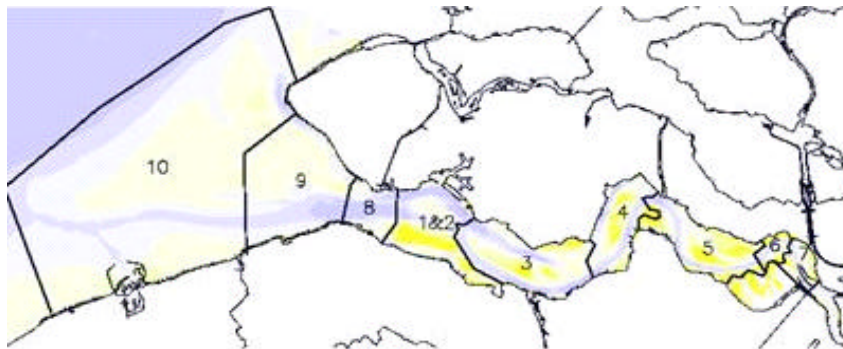
### 6.3 Veranderingen in de zandhuishouding

#### Resultaten

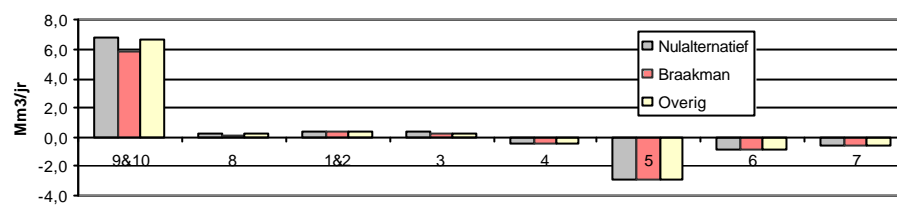
Figuur 6-2 toont de zandbalans van de Westerschelde voor het nulalternatief en de beide uitpolderingsvarianten voor de periode 2001-2030. De veranderingen in de zandhuishouding ten gevolge van de grote uitpoldering Braakman kunnen als volgt worden gekarakteriseerd (zie Figuur 6-2):

- Een relatieve erosie van het mondingsgebied, het overgangsg gebied 8 en de gebieden 1& 2 en 3 in het westelijk deel van de Westerschelde.
- Een relatieve sedimentatie in gebied 4, in het midden deel en in de gebieden 5, 6 en 7 in het oostelijk deel van de Westerschelde.
- Een relatief zeewaarts gericht sedimenttransport op de zeewaartse rand van de monding.
- Een geringe versterking van het zeewaarts gericht sediment transport in het overgangsg gebied 8, het westelijk deel van de Westerschelde.

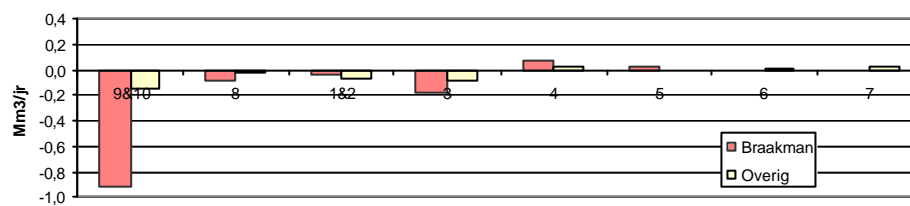
- Een klein relatief landwaarts gericht sediment transport in het midden en oostelijk deel van de Westerschelde.



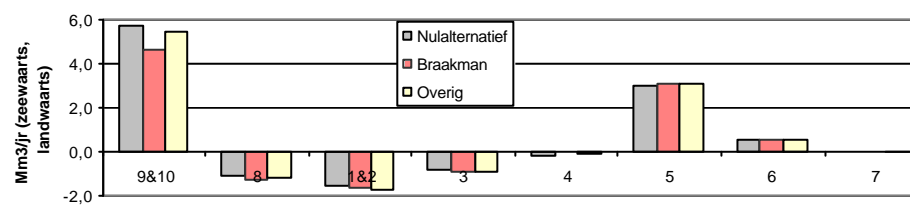
Totale netto erosie en sedimentatie 2001-2030, ESTMORF



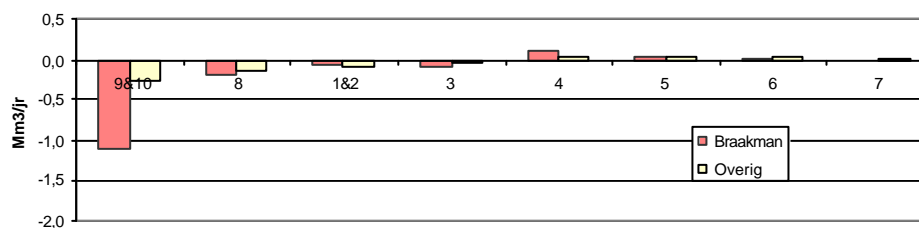
Verandering totale netto erosie en sedimentatie 2001-2030, ESTMORF



Afgeleid sedimenttransport 2001-2030, ESTMORF



Verandering transport 2001-2030, ESTMORF



---

***Figuur 6-2 Veranderingen in de zandbalans volgens het nulalternatief en de uitpolderingsvarianten. Positieve getallen duiden op sedimentatie en landwaarts transporten. Negatieve getallen betekenen erosie en zeewaarts gerichte transporten.***

De grootte van de verandering in de totale netto volumeveranderingen en de grootschalige transporten neemt af in de tijd (niet getoond): in de periode 2001-2010 zijn de veranderingen van de transporten ongeveer 1,5 keer groter dan gemiddeld over de periode 2001-2030.

De variant overige uitpolderingen wordt gekenmerkt door kwalitatief vergelijkbare veranderingen in de zandbalans. De grootte van de veranderingen is echter kleiner.

### ***Interpretatie***

Bij het interpreteren van de morfologische effecten van uitpolderen moet een onderscheid worden gemaakt tussen de zogenaamde initiële effecten direct na de aanleg, en de langere termijn effecten op de morfologische tijdschaal<sup>11</sup> van het estuarium als geheel.

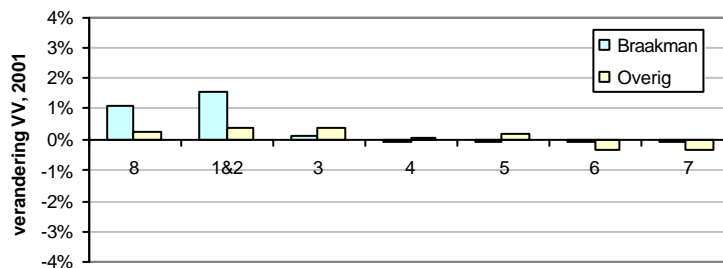
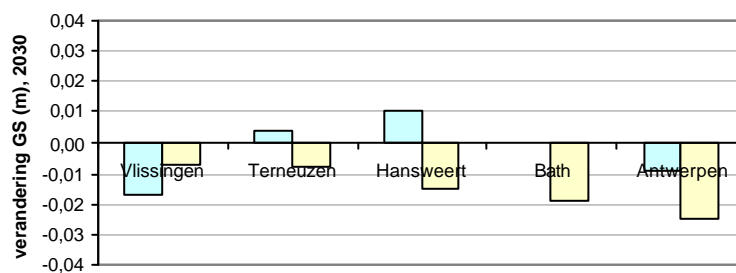
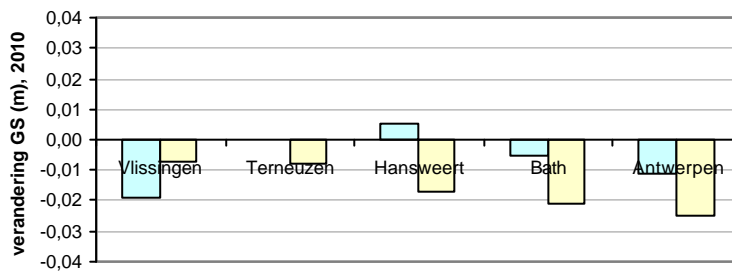
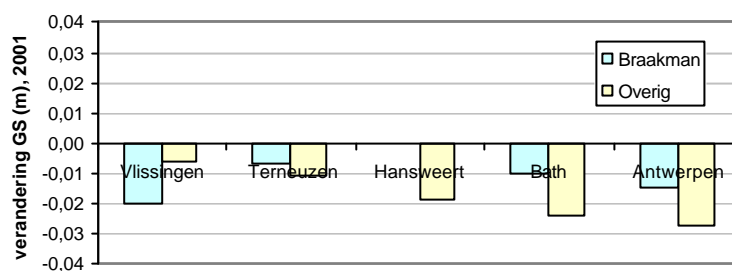
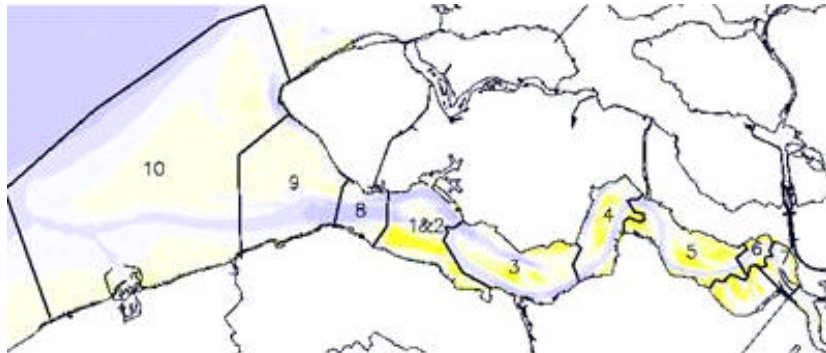
Een uitpoldering veroorzaakt in eerste instantie een toename van de komberging in het estuarium en een toename van het getijvolume zeewaarts van de uitpoldering. Deze toename van het getijvolume betekent hogere stroomsnelheden zeewaarts van de uitpolderingen waardoor in dit gebied de bodemwrijving groter wordt. Het effect van een grotere bodemwrijving is een demping van het getij; zowel zeewaarts als landwaarts van de uitpoldering neemt de getijslag af (zie Figuur 6-3, getijslag 2001). De grootte van deze initiële afname van de getijslag is afhankelijk van de verhouding tussen de grootte van het extra getijvolume als gevolg van de uitpoldering en het lokale getijvolume ter hoogte van de uitpoldering.

De initiële afname van de getijslag landwaarts van de uitpoldering gaat gepaard met een afname van het getijvolume en het evenwichtsdoorstroomoppervlak. Het doorstroomoppervlak is groter dan het initiële evenwichtsdoorstroomoppervlak geworden waardoor in dit gebied initieel sedimentatie optreedt.

De initiële afname van de getijslag zeewaarts van de uitpoldering betekent eveneens een afname van het getijvolume. Deze afname is echter altijd kleiner dan de toename van het getijvolume door de extra komberging in het gebied dat wordt uitgepolderd. Zeewaarts van de uitpoldering is dus altijd sprake van een netto initiële toename van het getijvolume. Een groter getijvolume betekent een toename van het evenwichtsdoorstroomoppervlak. Het gebied zeewaarts van de uitpoldering zal gaan eroderen.

Het is vooral deze erosie zeewaarts van de uitpoldering waardoor de uiteindelijke effecten anders zijn dan de initiële effecten. Immers, de erosie van dit gebied gaat gepaard met een afname van de stroomsnelheden en de bodemwrijving waardoor de getijslag weer toeneemt en het getij sterker doordringt in het estuarium (in vergelijking tot de initiële situatie). Hierdoor neemt ook landwaarts van de uitpoldering na verloop van tijd de getijslag weer iets toe (vergelijk situatie 2010 en 2030 met 2001 in Figuur 6-3). Het getijvolume en het evenwichtsdoorstroomoppervlak worden weer iets groter waardoor het gebied landwaarts van de uitpoldering na een periode van 'initiële' sedimentatie weer zal willen eroderen. In de berekening(en) tot 2030 neemt de sedimentatiesnelheid in de tijd al wel af, maar is nog niet

omgeslagen in een erosie ten opzichte van het nulalternatief. De verwachting is dat dit op een termijn van 50-100 jaar na aanleg van bijvoorbeeld een Braakman wel het geval zal zijn.



---

***Figuur 6-3 Relatieve veranderingen in de getijslag (GS) en de initiële verandering van het getijvolume (VV) als gevolg van de uitpolderingen. Vlissingen ligt in gebied 8, Terneuzen in gebied 3, Hansweert op de overgang 4/5 en Bath ligt in gebied 6.***

### **Conclusies**

De twee uitpolderingvarianten veroorzaken op een termijn van 30 jaar kwalitatief vergelijkbare veranderingen in de zandhuishouding van het estuarium: een relatieve erosie zeewaarts van de uitpolderingen en een sedimentatie landwaarts van de uitpoldering. Dit betekent globaal een verzwakking van de netto erosie- en sedimentatietendensen ten opzichte van het Nul-alternatief, en geringe versterking van de landwaarts gerichte transporten in het oostelijk deel en de zeewaarts gerichte transporten in het westelijk deel. Deze respons lijkt nog veel op de initiële respons doordat de morfologische tijdschaal van het estuarium naar verwachting 50 tot 100 jaar is. Op deze langere tijdschaal zal ook het gebied bovenstrooms van de inpoldering gaan eroderen.

### **6.4 Effecten op de stabiliteit van de geulen.**

Het ESTMORF model kan met de huidige instellingen grote veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem als gevolg van baggeren en storten niet goed kan voorspellen (zie Hoofdstuk 3). Bovendien zijn de onzekerheden in de absolute voorspelde morfologische ontwikkelingen groot. Daarom toont Figuur 6-4 de veranderingen in het patroon van erosie en sedimentatie voor de periode 2001-2030 ten opzichte van het nulalternatief, samen met de absolute erosie en sedimentatiepatronen volgens het nulalternatief als indicatie voor veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem.

Deze figuur bevestigt de grote lijnen van netto erosie en sedimentatie zoals die uit de zandbalans volgens: beide uitpolderingsvarianten veroorzaken een erosie van het mondingsgebied, het westelijk deel van de Westerschelde en een sedimentatie in het midden en oostelijk deel. De geringe erosie in het mondingsgebied is het meest uitgesproken in de Braakman variant, terwijl de relatieve sedimentatie in het oostelijk deel het grootst is in de variant Overige uitpolderingen. De veranderingen in erosie en sedimentatie zijn klein ten opzichte van de morfologische ontwikkeling in het Nul-alternatief. Dit betekent dat het beeld van de stabiliteit van de geulen zoals dat is afgeleid voor het nulalternatief niet wezenlijk verandert. Figuur 6-4 laat de volgende kleine relatieve veranderingen in de ontwikkeling van de geulen zien:

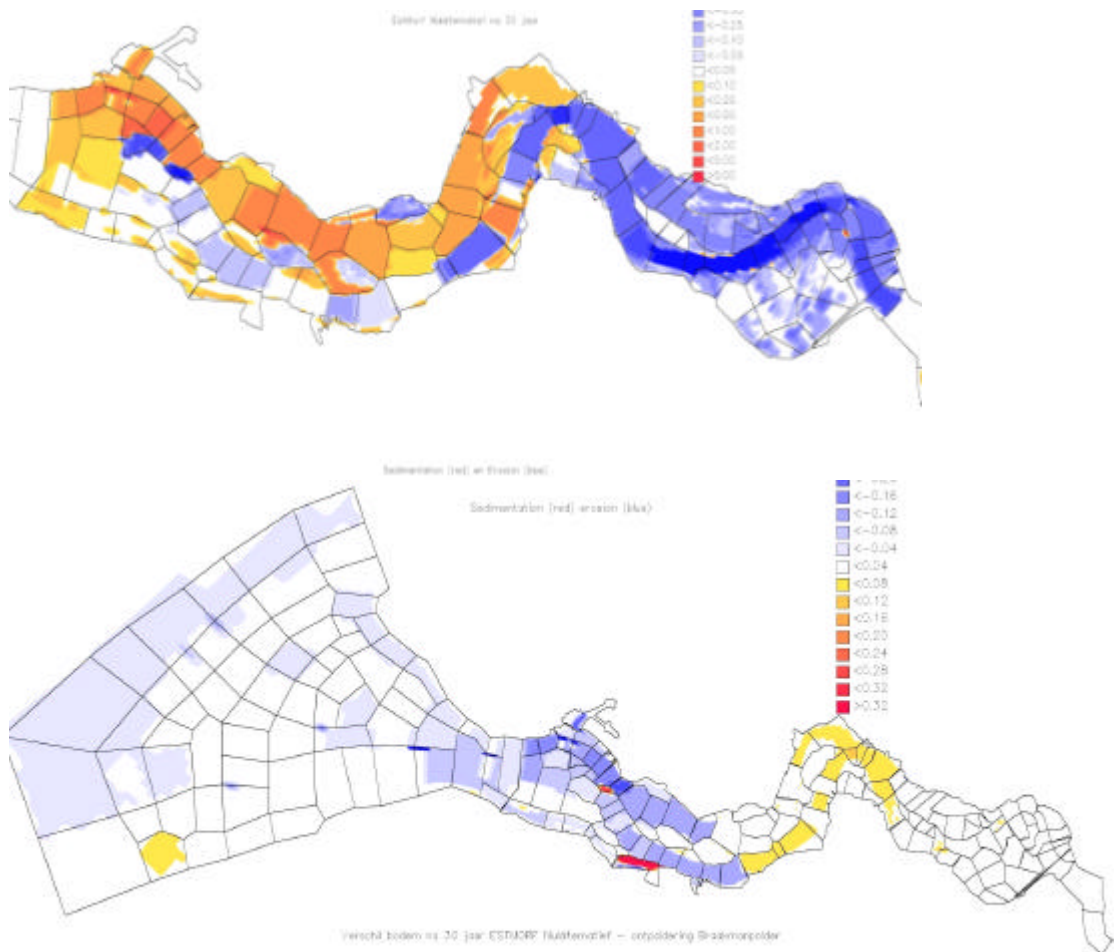
Het mondingsgebied verandert enigszins als gevolg van de Braakman uitpoldering: een geringe erosie van de geul Oostgat en Sardijngeul in het mondingsgebied langs de kust van Walcheren en de zeewaarts gelegen rand van het mondingsgebied. Een sedimentatie van enkele centimeters (na 30 jaar) in het vaargeul Pas van het Zand. De effecten van de overige uitpolderingen op de ontwikkeling van het mondingsgebied zijn (eveneens) verwaarloosbaar klein.

De mesogeulen in cel 2, het vaarwater langs Hoofdplaat en de Paulinapolder eroderen. Dit betekent een verandering in de trend volgens het nulalternatief. Deze erosie is een logisch gevolg van de lokaal iets toegenomen getijvolumina (orde 1%).

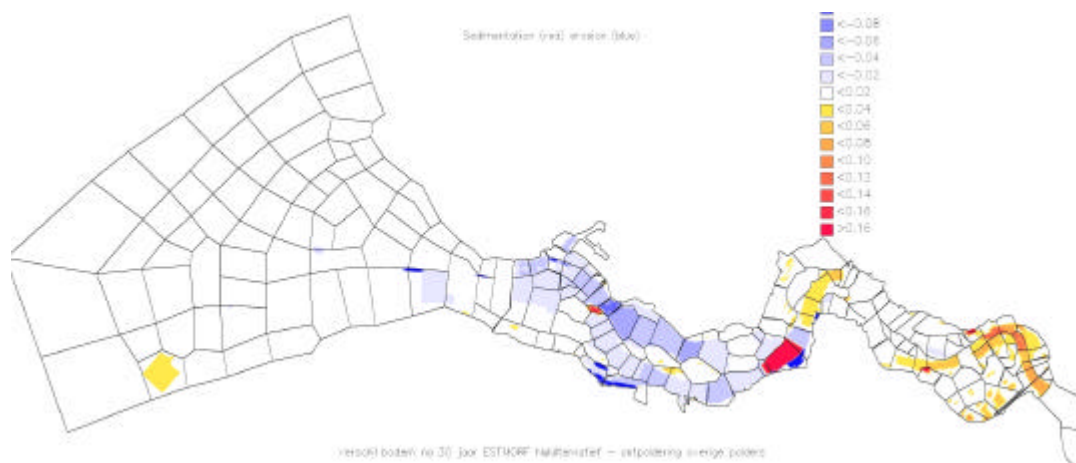
De kanteling van de geulen verandert enigszins in sommige macrocellen:

- In macrocel 1, nabij Vlissingen, kantelt het geulsysteem in de Braakman variant iets meer richting ebgeul / vaargeul: de ebgeul verdiept iets ten opzichte van de vloedgeul.
- In macrocel 4, nabij Hansweert kantelt het geulsysteem iets meer richting vloedgeul/vaargeul door de sedimentatie in deze geul ten gevolge van beide uitpolderingsvarianten. Dit betekent een verzwakking van de kantelingtendens volgens het nulalternatief.

In vooral de variant Overige Uitpolderingen kantelt het geulsysteem in het oostelijk deel iets richting vloedgeul/nevengeul door een sedimentatie in de vaargeul.







**Figuur 6-4 Erosie en sedimentatie na 30 jaar volgens het nulalternatief en de relatieve verandering van deze patronen als gevolg van de Braakman uitpoldering en de Overige gebieden uitpoldering. Let op verschillen in legenda.**

### Discussie en conclusies

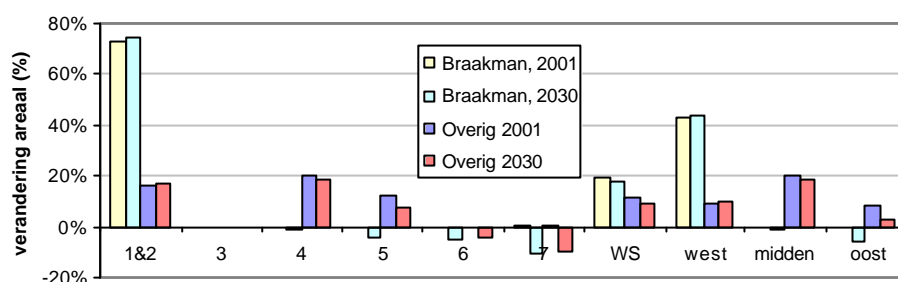
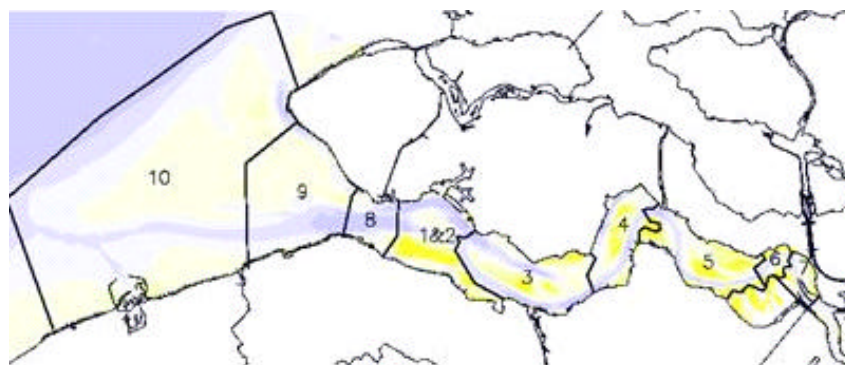
De twee uitpolderingsvarianten veroorzaken kleine veranderingen in de erosie en sedimentatie van de geulen in de Westerschelde. De resultaten impliceren een kleine afzwakking van de tendens van kantelen van het geulsysteem in het midden en oostelijk deel van de Westerschelde. De voorspelde relatieve sedimentatie (verminderde erosie) in de vaargeul betekent waarschijnlijk een kleine toename van het onderhoudsbaggerwerk.

Het mondingsgebied vertoont een lichte erosie als gevolg van de Braakman uitpoldering, met name in de 'keel' en in de geul langs de kust van Walcheren. Deze erosie is het gevolg van de (iets) toegenomen getijvolumina.

Een vergelijking van de twee varianten laat zien dat het netto effect van deze ontwikkelingen in de tijd, afhankelijk is van de locatie en grootte van de uitpoldering. Het gebied zeewaarts van de uitpoldering erodeert. Het gebied landwaarts wordt gekenmerkt door een relatieve sedimentatie. Naarmate een uitpoldering meer zeewaarts gelegen is zal de balans tussen erosie zeewaarts en sedimentatie landwaarts meer richting sedimentatie gaan, terwijl een meer landwaartse locatie tot relatief meer erosie leidt.

### 6.5 Effecten op de ontwikkeling van het intergetijdengebied

Figuur 6-5 toont de procentuele veranderingen in het areaal intergetijdengebied in de Westerschelde ten opzichte van het nulalternatief in 2001 en 2030. Hieruit kan het volgende worden geconcludeerd:



**Figuur 6-5 Verandering van het areaal intergetijdengebied ten opzichte van nulalternatief. Braakman 2001 betekent op de schaal van de hele Westerschelde (WS) een toename van het areaal intergetijdengebied van 20%. In 2030 is het verschil met het nulalternatief in 2030 nog steeds ongeveer 20%. Let op intergetijdengebieden zijn gedefinieerd ten opzichte van een vast referentievlak.**

De uitpolderingen resulteren in een significante initiële toename van het areaal intergetijdengebied:

- Voor de Westerschelde als geheel betekent de ontpoldering van de Braakman een uitbreiding van het areaal intergetijdengebied met 20%, op de ruimteschaal van gebied 1 & 2 bedraagt de uitbreiding maar liefst 70%. Deze initiële winst wordt gedurende de gehele periode 2001-2030 in stand gehouden.
- De ontpoldering van de overige gebieden betekenen op de schaal van de gehele Westerschelde een initiële uitbreiding van het areaal intergetijdengebied van 10%. Voor de deelgebieden 1 & 2, 3 en 5 varieert deze toename tussen de 10 en 20%. Ook voor de uitpolderingsvariant geldt dat de initiële winst in het areaal intergetijdengebied gedurende de eerste dertig jaar niet noemenswaardig veranderd.

### **Discussie en conclusies**

Op een tijdschaal van dertig jaar resulteert de aanleg van uitpolderingen tot een forse winst in het areaal intergetijdengebied, die op de schaal van de Westerschelde als geheel varieert tussen de 10 en 20%. De initiële winst gaat niet verloren. Deze winst zou op een termijn van 50 tot 100 jaar wel kunnen afnemen als de getijslag landwaarts van de uitpoldering weer gaat toenemen en de geulen gaan eroderen. Verder speelt opslibbing waarschijnlijk een belangrijke rol in de ontwikkeling van de uitpolderingen. Hierdoor zou de initiële winst van het areaal intergetijdengebied sneller kunnen afnemen dan voorspeld.

---

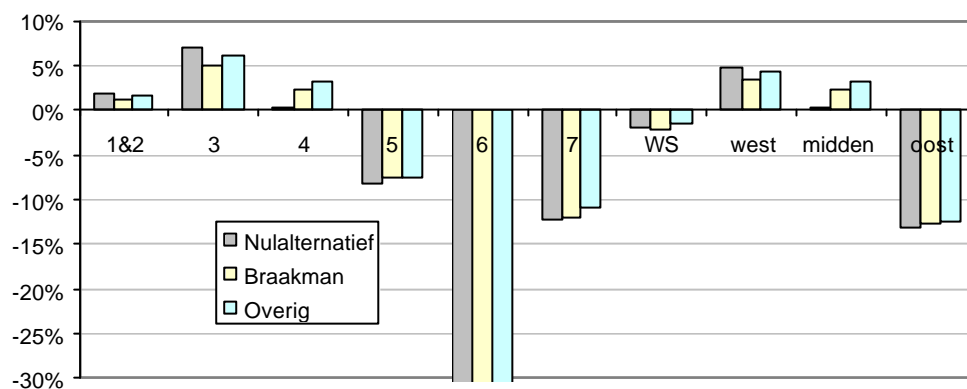
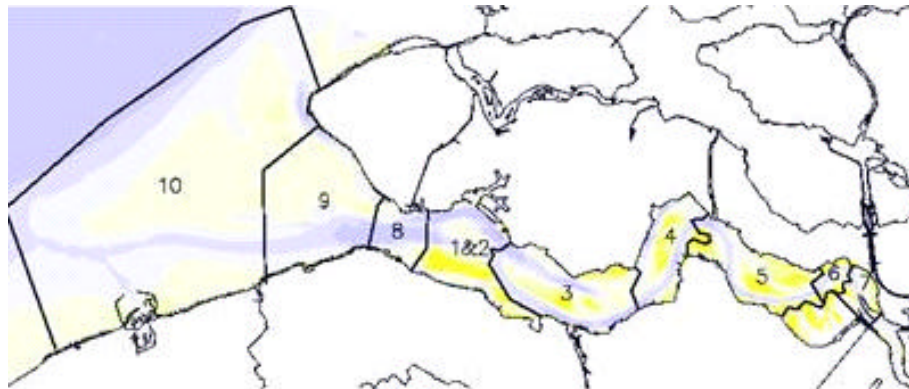
Ook voor de beoordeling van de effecten ten opzichte van het nulalternatief (relatieve effectenbepaling) geldt dat een meer realistische definitie van intergetijdengebieden, die gekoppeld wordt aan gemiddeld laag water en gemiddeld hoogwater, een wat ander beeld van de relatieve veranderingen kan laten zien (zie ook paragraaf 5.6).

## **6.6 Effecten op de ontwikkeling van het ondiepwatergebied in de Westerschelde**

De aanleg van de uitpolderingen gaat niet gepaard met een initiële toename van het areaal ondiep watergebied, de te ontpolderen gebieden liggen allen boven het niveau van NAP-2m. Figuur 6-6 toont de indicatieve veranderingen in het areaal ondiepwatergebied als gevolg van het nulalternatief en de twee uitpolderingsvarianten. Hieruit kan het volgende worden geconcludeerd:

Voor de Westerschelde als geheel verandert er weinig in het totale areaal ondiepwatergebied. Ook bij de twee uitpolderingsvarianten is er sprake van een kleine afname van het areaal in 30 jaar tijd. Ook per deelgebied verandert de richting van de verandering niet. Er is wel sprake van een versterking of verzwakking van de ontwikkelingstendensen zoals die volgens uit het ESTMORF nulalternatief:

- De gebieden 1& 2 en 3 in het westelijk deel vertonen een kleine afname van het areaal ondiep watergebied ten opzichte van het nulalternatief. Dit geldt het sterkst voor de Braakman variant. De relatieve afname wordt veroorzaakt door de relatieve erosie van de geulen.
- In de gebieden 4, in het midden deel en de gebieden 5, 6 en 7 in het oostelijk deel treedt een relatieve toename van het areaal op. Deze toename hangt samen met de sedimentatie in de geulen.
- De variant Overige uitpolderingen lijkt voor een iets grotere relatieve toename van het ondiepwatergebied te zorgen. De orde van grootte van de verandering is wel hetzelfde.



**Figuur 6-6** Indicatie van de totale verandering van het areaal ondiepwatergebied in het Nul-alternatief en de twee uitpolderingsalternatieven gedurende de periode 2001-2030.

## 6.7 Discussie en conclusies

In de voorgaande paragrafen is nagegaan hoe twee uitpolderingsvarianten de voorspelde morfologische ontwikkelingen volgens het nulalternatief beïnvloeden. Hierbij is vergelijkenderwijs gekeken naar: de zandhuishouding, de erosie en sedimentatie in de geulen van de Westerschelde en monding, en de arealen intergetijdengebied en ondiepwatergebied om de onderzoeksvragen 1 t/m 4 te kunnen beantwoorden. De antwoorden op deze vragen kunnen als volgt worden samengevat:

1. De twee uitpolderingsvarianten veroorzaken op een termijn van 30 jaar kwalitatief vergelijkbare veranderingen in de zandhuishouding van het estuarium: een relatieve erosie zeewaarts van de uitpolderingen en een sedimentatie landwaarts van de uitpoldering. Deze veranderingen gaan gepaard met een geringe toename van de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel en een toename van de zeewaarts gerichte transporten (export) in het westelijk deel. Dit betekent in vergelijking tot het nulalternatief een verzwakking van de erosie en sedimentatietendensen en een versterking van de residuele sedimenttransporten.

- 
2. De twee uitpolderingsvarianten veroorzaken kleine veranderingen in de erosie en sedimentatie van de geulen, die duiden op kleine veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem (vraag 2): de resultaten impliceren een afzwakking van de tendens van kantelen van het geulsysteem in het midden en oostelijk deel van de Westerschelde. De relatieve sedimentatie (verminderde erosie) in de vaargeul betekent waarschijnlijk een kleine toename van het onderhoudsbaggerwerk
  3. Op een tijdschaal van dertig jaar resulteert de aanleg van uitpolderingen een forse winst van het areaal intergetijdengebied, die op de schaal van de Westerschelde als geheel varieert tussen de 10 en 20%. De initiële winst gaat niet verloren tot 2030. Deze winst zou op een termijn van 50 tot 100 wel kunnen afnemen als de getijslag landwaarts van de uitpoldering weer gaat toenemen en de geulen gaan eroderen. Het beeld van de veranderingen in het areaal intergetijdengebied is gevoelig voor de gehanteerde definitie en de onzekerheden rondom zeespiegelstijging (zie ook paragraaf 5.6.3).
  4. De tendensen in de ontwikkeling van het areaal ondiep watergebied veranderen niet wezenlijk als gevolg van de uitpolderingen. In het westelijk deel treedt een relatieve afname op terwijl in het midden en westelijk deel een relatieve uitbreiding optreedt. Deze veranderingen hangen samen met de voorspelde relatieve erosie van de geulen in het westelijk deel en de relatieve sedimentatie in het oostelijk deel.

Deze effecten betekenen dat uitpolderingen een relatief grote en duurzame invloed hebben op de functie Natuur en een relatief kleine invloed hebben op de Veiligheid en Toegankelijkheid in het estuarium.

Een vergelijking met de resultaten van een vergelijkbare studie voor het Humber estuarium leert dat deze voorspelde respons in de Westerschelde nog veel lijkt op de initiële respons. Op de morfologische tijdschaal van het estuarium, die naar schatting 50 tot 100 jaar, zullen de effecten van de uitpolderingen veranderen. De resultaten van de studie voor de Humber geven dat de langtermijn effecten van de uitpolderingen in de Westerschelde waarschijnlijk als volgt kunnen worden gekarakteriseerd:

- Op de ruimteschaal van het gehele estuarium veroorzaakt een uitpoldering altijd een relatieve erosie in termen van een zandbalans.
- Het gebied zeewaarts van de uitpoldering erodeert. Het areaal intergetijdengebied<sup>12</sup> vertoont hier een relatieve afname als gevolg van de uitpoldering.
- Het gebied landwaarts van de uitpoldering wordt gekenmerkt door een sedimentatie, waarbij er sprake is van een relatieve toename van het areaal intergetijdengebieden.
- Naarmate een uitpoldering meer zeewaarts is gelegen zal de balans tussen erosie zeewaarts en sedimentatie landwaarts meer richting sedimentatie gaan, terwijl een meer landwaartse locatie tot relatief meer erosie leidt.
- De initiële toename van het areaal intergetijdengebied wordt alleen bij zeewaarts gelegen uitpolderingen behouden. Bij meer landwaarts gelegen uitpolderingen verdwijnt de initiële winst na verloop van tijd
- Een versnelde zeespiegelrijzing zal gepaard gaan met een afname van het areaal plaat.

---

<sup>12</sup> Intergetijdgebied is het gebied boven gemiddeld laag water; een in de ruimte en tijd variërend referentievlak.

## 7 Morfologische effecten van een

### 7.1 Inleiding

#### 7.1.1 Algemeen

De Antwerpse haven heeft een centrale rol in het economisch functioneren van de regio en van het met de haven verbonden achterland. Om het gewenste economische verkeer van en naar de regio en het achterland te garanderen wordt een verdere verruiming van de vaarweg naar Antwerpen overwogen. In het Strategisch MER worden drie toegankelijkheidsalternatieven onderzocht (Kennisgeving, 2003):

1. Een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 12,5 meter, uitgaande van een kielspeling van 12,5% (een totale verdieping van circa 0,8 m). Dit betekent een minimale gewaarborgde waterdiepte van 14,1 meter ten opzichte van gemiddeld laag laagwater spring (GLLWS).
2. Een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 13,1 meter, uitgaande van een kielspeling van 12,5% (een verdieping van circa 1,4 m). Dit betekent een minimale gewaarborgde waterdiepte van 14,7 meter ten opzichte van gemiddeld laag laagwater spring (GLLWS).
3. Voorhavenontwikkeling, eventueel gecombineerd met een verdieping van de vaargeul.

Het morfologisch onderzoek richt zich op het bepalen van de morfologische effecten van de eerste twee toegankelijkheidsalternatieven, waarbij de vaargeul naar Antwerpen verder wordt verdiept. De belangrijkste vraag die moet worden beantwoord is of een verdere verdieping van de vaargeul een bedreiging vormt voor de instandhouding van het dynamische meergeulensysteem. Om deze vraag te kunnen beantwoorden worden verschillende verdiepingsvarianten bestudeerd waarbij de effecten worden geëvalueerd ten opzichte van de verwachte ontwikkelingen in het nulalternatief. Hierbij wordt net als in het nulalternatief gebruik gemaakt van de morfologische indicatoren zoals gedefinieerd in Hoofdstuk 2.

#### 7.1.2 Het vooronderzoek naar het te verwachten onderhoudsbaggerwerk en de stortstrategie

De morfologische effecten van een verdere verdieping van de vaargeul zijn sterk gerelateerd aan de verandering in het volume onderhoudsbaggerwerk (de globale plaatsen veranderen niet), het volume aanlegbaggerwerk en de wijze van berging van de baggerspecie, de stortstrategie. Uitgangspunt voor het vaargeulbeleid in de Westerschelde en het Nederlandse mondingsgebied is dat alle gebaggerde specie in het systeem wordt teruggestort. Voor de specie die vrijkomt bij een verdere verdieping, de zogenaamde aanlegspecie, is het de vraag of deze ook in het estuarium kan worden teruggestort of dat deze specie (3 tot 6.6 Mm<sup>3</sup> in totaal) buiten het estuarium moeten worden gestort (in zee of op land). Uit eerder onderzoek is gebleken dat met name het storten van onderhoudsspecie kritisch kan zijn voor de instandhouding van het meergeulensysteem. Daarom is het van belang om een zo goed als mogelijke voorspelling te maken van het te verwachten onderhoudsbaggerwerk. De stortstrategie kan echter ook van invloed zijn op het te verwachten onderhoud, waardoor diverse bagger- en stortstrategieën kunnen worden

---

bedacht die elk hun voor- en nadelen hebben. Daarom is binnen het kader van de S-M.E.R. en als onderdeel van het morfologisch onderzoek een vooronderzoek uitgevoerd (Tanczos et al, 2004) naar:

1. De te verwachten verandering van het onderhoudsbaggerwerk in de Westerschelde als gevolg van een verdieping van de vaargeul naar een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 12,5 m en 13,1 meter.

- 
2. Een verbetering van de stortstrategie die zich richt op het zo min mogelijk kantelen van het stelsel van de grote eb – en vloedgeulen in de macrocellen van de Westerschelde. Deze eis aan de stortstrategie is nodig om de instandhouding van het huidige meergeulensysteem met macro- en mesocellen, zoveel als mogelijk te kunnen garanderen. De resultaten voor het nulalternatief, en de gesignaleerde knelpunten in het nulalternatief (Hoofdstuk 4) en het huidige vaargeulonderhoud (Jeuken et al., 2003), vormden de basis voor het zoeken naar een verbetering in de stortstrategie.
  3. Een verkenning naar de invloed van verschillende stortstrategieën op de sedimentatie op de vier grote drempels in de Westerschelde.

De belangrijkste bevindingen uit dit vooronderzoek met betrekking tot deze drie aspecten kunnen als volgt worden samengevat (zie Tanczos et al, 2004):

Een verdieping van de vaargeul voor een getijongebonden scheepvaart met een diepgang van 13.1 m gaat vermoedelijk gepaard met een toename van het onderhoudsbaggerwerk van 15-20%. Voor een verdieping van de vaargeul voor een getijongebonden scheepvaart met een diepgang van 12.5 m bedraagt de verwachte toename slechts enkele procenten. De onzekerheden in de absolute waarden zijn groot omdat het te onderhouden oppervlakte van de baggergebieden moest worden geschat. De drempel van Bath vertoont een nog niet begrepen afwijkend beeld. Op deze drempel neemt het berekende onderhoud af bij een verdere verdieping. Een verbreding van de vaargeul veroorzaakt wel een significante toename van het onderhoud doordat het te onderhouden oppervlak toeneemt.

De potentiële knelpunten met betrekking tot de stabiliteit van het geulsysteem in het nulalternatief kunnen worden gemitigeerd door de stortstrategie aan te passen. In de voorlopig verbeterde strategie wordt er t.o.v. het nulalternatief relatief meer in de vaargeul en in het oosten van de Westerschelde gestort. De verbeterde stortstrategie heeft een positief effect op de stabiliteit van het meergeulensysteem. De modelresultaten suggereren dat ook bij een verdieping van de vaargeul tot 13.1 m het waarschijnlijk mogelijk is het storten (van de toegenomen hoeveelheid baggermateriaal) zodanig in te richten dat het meergeulensysteem wordt behouden. Wel moet de stortstrategie flexibel worden gehouden omdat er volgens het model na verloop van tijd op andere locaties dan in het nulalternatief problemen kunnen ontstaan met de stabiliteit van het geulsysteem. Met het huidige SOBEK model is het alleen mogelijk om een stortstrategie op hoofdlijnen uit te werken. Het model laat zien hoeveel gestort kan worden en in welke geulen. Het is niet mogelijk om te zeggen waar precies in het profiel dit het beste kan. Dit kan alleen worden onderzocht met een gevalideerd DELFT3D model voor het estuarium waarvan de voorspelkracht bekend is en aanvullend inzicht in de historische ontwikkelingen van het baggeren en storten in het estuarium.

Het storten volgens de 'verbeterde strategie' leidt tot een extra sedimentatie in de huidige baggerlocaties t.o.v. het nulalternatief. Volgens een verkenning met het initiële DELFT3D-model gaat de verbeterde stortstrategie gepaard met een toename van het onderhoudsbaggerwerk van 10%. Deze toename treedt praktisch geheel op in de eroderende vloedgeul van macrocel 4 (Gat van Ossensisse – Overloop van Hansweert). De resultaten van de verkenning met het DELFT3D-model geven aan dat een verfijning van de voorlopig verbeterde stortstrategie nodig en waarschijnlijk mogelijk is. Deze verfijning kan echter niet binnen het strakke tijdschema van de studie voor de S-MER worden gerealiseerd (zie ook de aanbevelingen in Tanczos et al. 2004 en Hoofdstuk 9). Bij de invulling en interpretatie van de resultaten van de verschillende verdiepingsalternatieven



zoals gerapporteerd in dit hoofdstuk dient daarom rekening te worden gehouden met deze onzekerheden.

## 7.2 De verdiepingsalternatieven

Om de morfologische effecten van een verdere verdieping van de vaargeul te kunnen kwantificeren, gegeven de onzekerheden in vooral het te verwachten onderhoudsbaggerwerk, zijn vijf verschillende varianten bestudeerd met behulp van het 1D morfologisch model instrumentarium (Tabel 7-1).

Centraal in de effectvoorspelling staan de verdiepingsalternatieven 13.1m diepgang (berekening 2) en diepgang 12.5m (berekening 3). Deze verdiepingen zijn in de bodemschematisatie van het model aangebracht. Het storten van de aanlegspecie binnen het estuarium gebeurt in de eerste twee jaar direct na de verdieping. Dit zal in de praktijk niet eenvoudig op deze wijze kunnen worden uitgevoerd, maar deze procedure is nodig om het effect van het storten buiten het estuarium te kunnen bepalen: voor het meest extreme verdiepingsalternatief (13.1m) wordt op basis van de resultaten van de berekeningen 1 en 2 nagegaan in hoeverre de berging van de aanlegspecie binnen of buiten het estuarium invloed heeft op de te verwachten morfologische effecten. Berekening 4 is uitgevoerd om de invloed van de stortstrategie op de voorspelde effecten van een verdieping te kunnen identificeren. De laatste berekening, 5, is een berekening waarbij de zandwinning wordt afgebouwd naar nul. Het doel van deze berekening is tweeledig: het afbouwen van de zandwinning is een optie voor het beleid en beheer. Het is echter de vraag of het stoppen van zandwinning, zonder wezenlijke verdere aanpassingen van de stortstrategie, kan zonder de stabiliteit van het geulsysteem aan te tasten. Anderzijds kan de berekening worden beschouwd als een verdiepingsberekening waarbij het onderhoud 2.4 Mm<sup>3</sup>/jr hoger is omdat het stoppen van zandwinning effectief een afname van de stortruimte binnen het estuarium betekent. In deze vijfde berekening is de zandwinning in de vloedgeulen Schaar van Waarde (cel 5), de Overloop van Hansweert (cel 4) en de Everingen (cel 3) gestopt. De zandwinning in de ebgeul van cel 5 (locatie Plaatzijde van de Overloop van Valkenisse), ter grootte van 0,91 Mm<sup>3</sup>/jr (in het profiel), is in de berekening veranderd in een baggerlocatie ten behoeve van het onderhoud van de vaargeul. In het verdiepingsalternatief zonder zandwinning moest de voorlopig verbeterde stortstrategie iets worden aangepast om een te grote sedimentatie in de vaargeul in gebied 4 te voorkomen (overschrijden van een kritische drempel, zie Figuur 7-1 en bijlage D).

**Tabel 7-1 Overzicht van 1D-morfologische modelberekeningen (ESTMORF en SOBEK) ten behoeve van het verdiepingsalternatief. WS is Westerschelde.**

Omschrijving verdiepingsalternatieven				
Nr. en naam van de berekening	Diepgang 13,1m of 12,5m	Aanlegspecie WS in of uit het estuarium (Mm <sup>3</sup> , in het profiel)	Zandwinning WS (Mm <sup>3</sup> profiel)	Onderhoudsvolume in de Westerschelde en stortstrategie (Mm <sup>3</sup> profiel)
1, 13.1-uit	13.1	uit, 6.6	2.4	11.2, verbeterd
2, 13.1-in	13.1	in, 6.6	2.4	11.2, verbeterd
3, 12.5-in	12.5	in, 3.1	2.4	9.9, verbeterd
4, 13.1-in-stortNul	13,1	in, 6.6	2.4	11, 2, nulalternatief
5, 13.1-in-zwin0	13,1	in, 6.6	0	11.2, Verbeterd

---

Omschrijving nulalternatief (referentie t.b.v. effectbepaling)				
0, Nulalt.	huidige	-	2,4	nulalternatief, 9.6, zie Figuur 5-1

Op basis van de ESTMORF en SOBEK resultaten voor de twee verdiepingsalternatieven 2 en 3 en het nulalternatief 2010 zijn vervolgens enkele verkennende initiële berekeningen met het 3D morfologische DELFT3D model gemaakt (zie Tabel 7-2). In de DELFT3D-berekeningen die in dit rapport worden gerapporteerd worden vaargeulonderhoud en zandwinning niet gemodelleerd. Reden hiervoor is dat baggeren en storten nog niet waren geïmplementeerd en getest in de software van DELFT3D-online-sed toen de berekeningen voor het nulalternatief moesten worden gemaakt (oktober 2003).

Sinds februari 2004 is dit wel mogelijk en zijn enkele verkennende berekeningen met vaargeulonderhoud in het kader van het vooronderzoek uitgevoerd (Tanczos et al, 2004). Omwille van de vergelijking met de eerder uitgevoerde berekeningen voor het nulalternatief zijn de twee verdiepingsalternatieven met DELFT3D (2 en 3 in Tabel 7-2) ook zonder vaargeulonderhoud en zandwinning uitgevoerd.

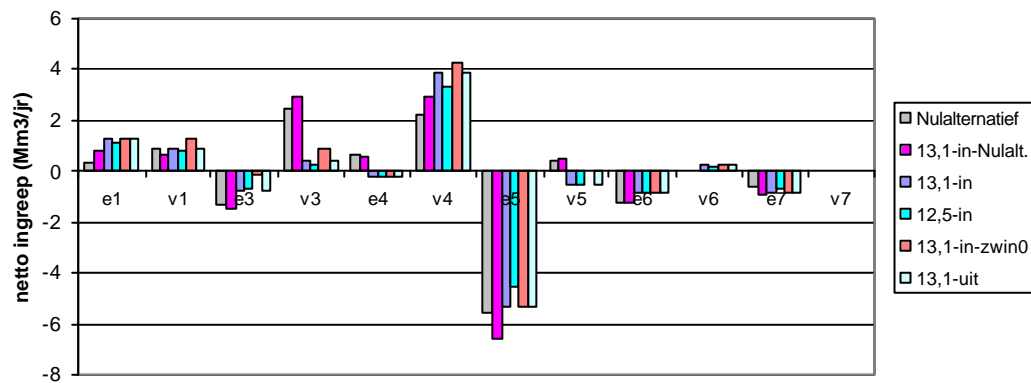
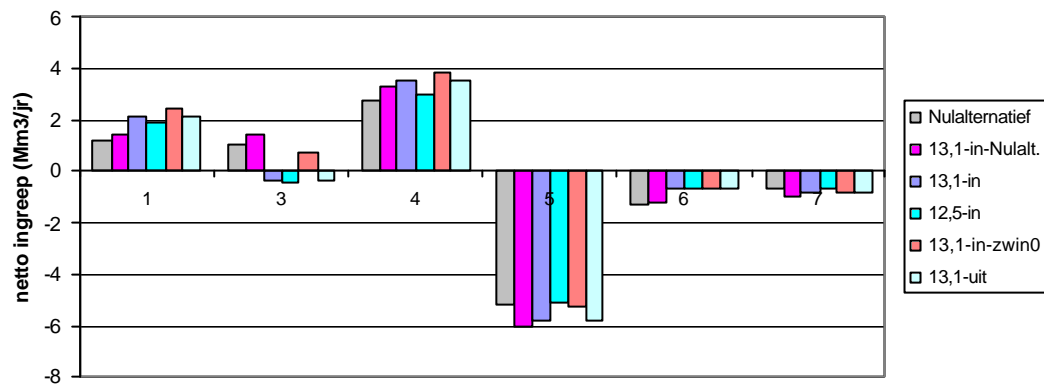
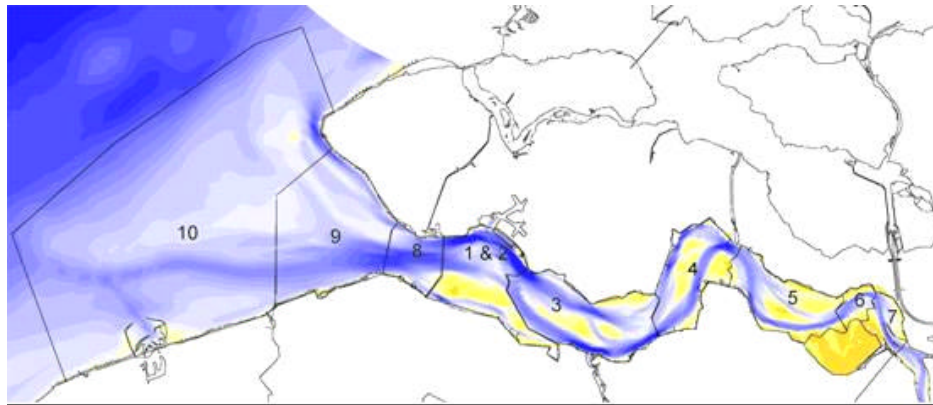
Het niet simuleren van deze ingrepen betekent feitelijk dat de resultaten van de DELFT3D-berekeningen een soort autonome ontwikkeling beschrijven. Omdat het initiële berekeningen zijn die vergelijkenderwijs worden gebruikt is dit geen grote beperking in het gebruik van de resultaten.

**Tabel 7-2 Omschrijving van de DELFT3D-berekeningen.**

Omschrijving verdiepingalternatieven met behulp van DELFT3D				
nr. en code	periode	Beginbodem	Periode resultaat beschouwing	Storten van aanlegspecie
2 x16	2001-2003	Met DELFT3D 'ingespeelde' bodem 2002 afkomstig uit het nulalternatief. De initiële diepte <i>veranderingen</i> ten gevolge van de verdieping (13.1m) zijn vervolgens in deze 2002 bodem aangebracht.	2002-2003	6.6 Mm <sup>3</sup> in WS in 1 jaar tijd waarbij er ieder rekentijdstap een bepaalde hoeveelheid <sup>a</sup> wordt gestort volgens voorlopig verbeterde stortstrategie
X17	2010-2012	Met ESTMORF bepaalde 2010 bodem voor het verdiepingalternatief 13.1m, die vertaald is naar het rooster van DELFT3D	2011-2012	n.v.t.
3 x18	2001-2003	Met DELFT3D 'ingespeelde' bodem 2002 afkomstig uit het nulalternatief. De initiële diepte <i>veranderingen</i> ten gevolge van de verdieping (12.5m) zijn vervolgens in deze 2002 bodem aangebracht.	2002-2003	3.1 Mm <sup>3</sup> in 1 jaar tijd volgens voorlopig verbeterde stortstrategie
nulalternatief DELFT3D				
0 x19	2001-2003	Initiële bodem 2001	2002-2003	n.v.t.
X20	2010-2012	Met ESTMORF bepaalde 2010 bodem, vertaald naar het rooster van DELFT3D	2011-2012	n.v.t.
X21	2010-2012	Met SOBEK bepaalde 2010 bodem, vertaald naar het rooster van DELFT3D	2011-2012	n.v.t.

<sup>a</sup> Die hoeveelheid is gelijk aan:

Figuur 7-1 toont de netto ingrepen per aggregatieniveau van de zandbalans (de macrocellen of bochtgroepen) en per geul in een macrocel. Voor een overzicht van baggeren, storten en zandwinning op deze aggregatieniveaus en kaartjes met locatie van bagger- en stortvakken, zie bijlage D. Voor het mondingsgebied wordt uitgegaan van hetzelfde haven- en vaargeulonderhoud als in het nulalternatief (bij elkaar 6 Mm<sup>3</sup> per jaar).



**Figuur 7-1 Netto ingrepen (som van baggeren, storten en zandwinning) per macrocel bochtgroep en per geul in een macrocel. Een negatief getal betekent netto baggeren, een positief getal duidt op netto storten. e# betekent de ebgeul in cel#, v# betekent de vloedgeul in cel#.**

---

## 7.3 Effecten op de ontwikkelingen in de zandhuishouding

### 7.3.1 Veranderingen in de zandbalans als gevolg van een verdieping volgens ESTMORF

Figuur 7-2 toont de berekende zandbalansen van de Westerschelde en monding gedurende de periode 2001-2030 voor het nulalternatief en de verschillende verdiepingsalternatieven<sup>13</sup>. De figuren 6.3 t/m 6.5 tonen de veranderingen in het vloedvolume, de getijslag en het volume intergetijdengebied ten behoeve van de interpretatie van de veranderingen in de zandhuishouding.

#### ***Verdiepen naar een getijongebonden diepgang van 13.1m met storten volgens het nulalternatief***

De verdiepingsvariant 13.1 meter diepgang met storten van de aanlegspecie en onderhoudsspecie volgens het nulalternatief toont veranderingen in de zandhuishouding die vergelijkbaar zijn met de veranderingen zoals die zijn bepaald voor het nulalternatief, zij het dat de erosie en sedimentatie van de deelgebieden en de afgeleide netto sedimenttransporten tussen deelgebieden gemiddeld 30 procent groter zijn: De Westerschelde als geheel erodeert, terwijl het mondingsgebied sedimenteert (niet getoond). De erosie en sedimentatietendensen in de zes deelgebieden in de Westerschelde verschillen onderling (Figuur 7-2):

- De macrocellen 5, 6 en 7 in het oostelijk deel van de Westerschelde eroderen als gevolg van netto baggeren.
- Gebied 4, nabij Hansweert erodeert min of meer van nature.
- De gebieden 1& 2 en 3 in het westelijk deel van de Westerschelde worden beide gekenmerkt door een netto sedimentatie als gevolg van netto storten.
- Het overgangsgebied naar de monding, vak 8, verondiept enigszins.
- Het mondingsgebied, vak 9& 10, vertoont een geringe relatieve erosie

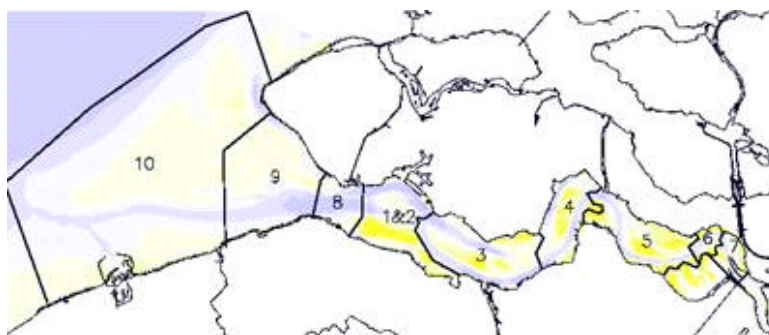
Deze ruimtelijke patronen van netto erosie en sedimentatie gaan gepaard met een grootschalig patroon van overwegend landwaarts gerichte zandtransporten in het oostelijk deel van de Westerschelde en zeewaarts gerichte transporten in het westelijk deel van de Westerschelde, de gebieden 1& 2 en 3. De zeewaartse rand van het meergeulenstelsel, ter hoogte van Vlissingen, wordt gekenmerkt door een zeewaarts gericht netto zandtransport dat iets groter is dan in het nulalternatief.

Deze veranderingen in de zandhuishouding worden door dezelfde mechanismen veroorzaakt als in het nulalternatief (zie ook paragraaf 4.4 voor verdere uitleg en Figuur 7-3 t/m Figuur 7-5): Het getijvolume in de Westerschelde neemt toe doordat de getijslag als gevolg van de verdieping initieel toeneemt in de gehele Westerschelde. Vooral in het oostelijk deel wordt deze initiële toename grotendeels in stand gehouden gedurende de periode 2001-2030 door het eroderen van dit deel van het estuarium onder invloed van netto baggeren. Daarnaast erodeert ook het intergetijdengebied in het oostelijk deel, waardoor de komberging en dus het getijvolume ook iets toenemen. De landwaarts gerichte sedimenttransporten naar het oostelijk deel worden veroorzaakt doordat in dit deel het werkelijke doorstroomoppervlak duidelijk groter is dan het evenwichtsdoorstroomoppervlak, als gevolg van het netto baggeren. In het westelijk deel, en in mindere mate in het midden deel, is het werkelijke doorstroomoppervlak juist kleiner dan het

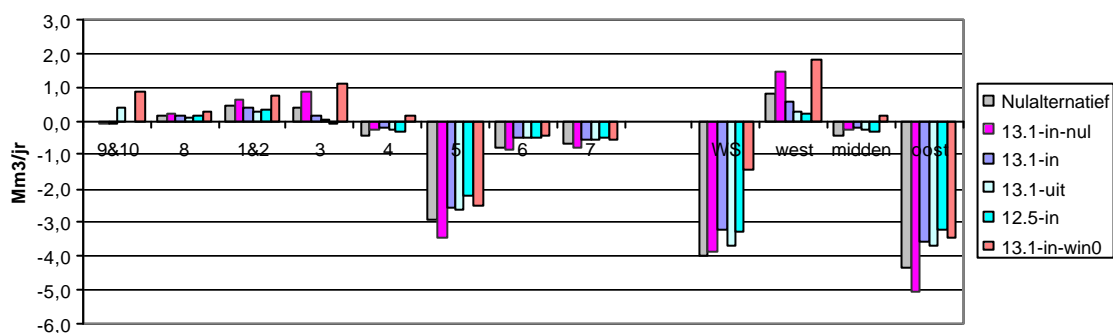
---

<sup>13</sup> De veranderingen voor de periode 2001-2010 zijn vergelijkbaar met de veranderingen voor de periode 2001-2030

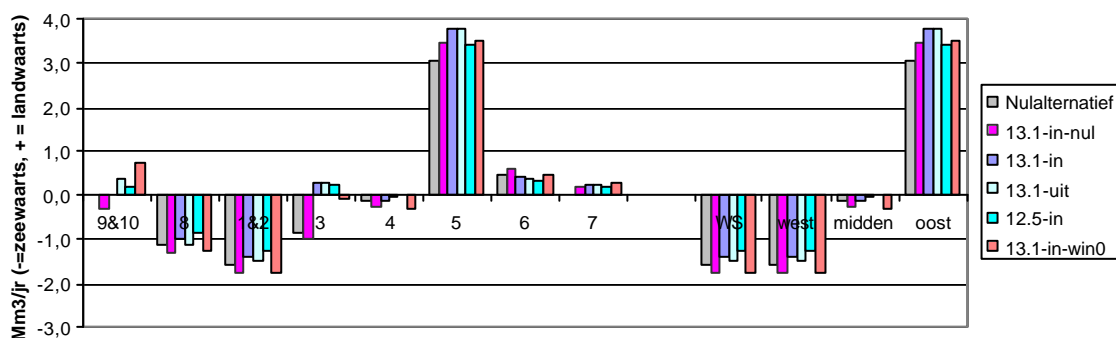
evenwichtsdoorstroomoppervlak door de toename van het getijvolume in vooral het oostelijk deel, die ook in het westelijk deel merkbaar is (maar kleiner), en het netto storten van sediment in het westelijk deel.



Totale netto erosie en sedimentatie 2001-2030, ESTMORF

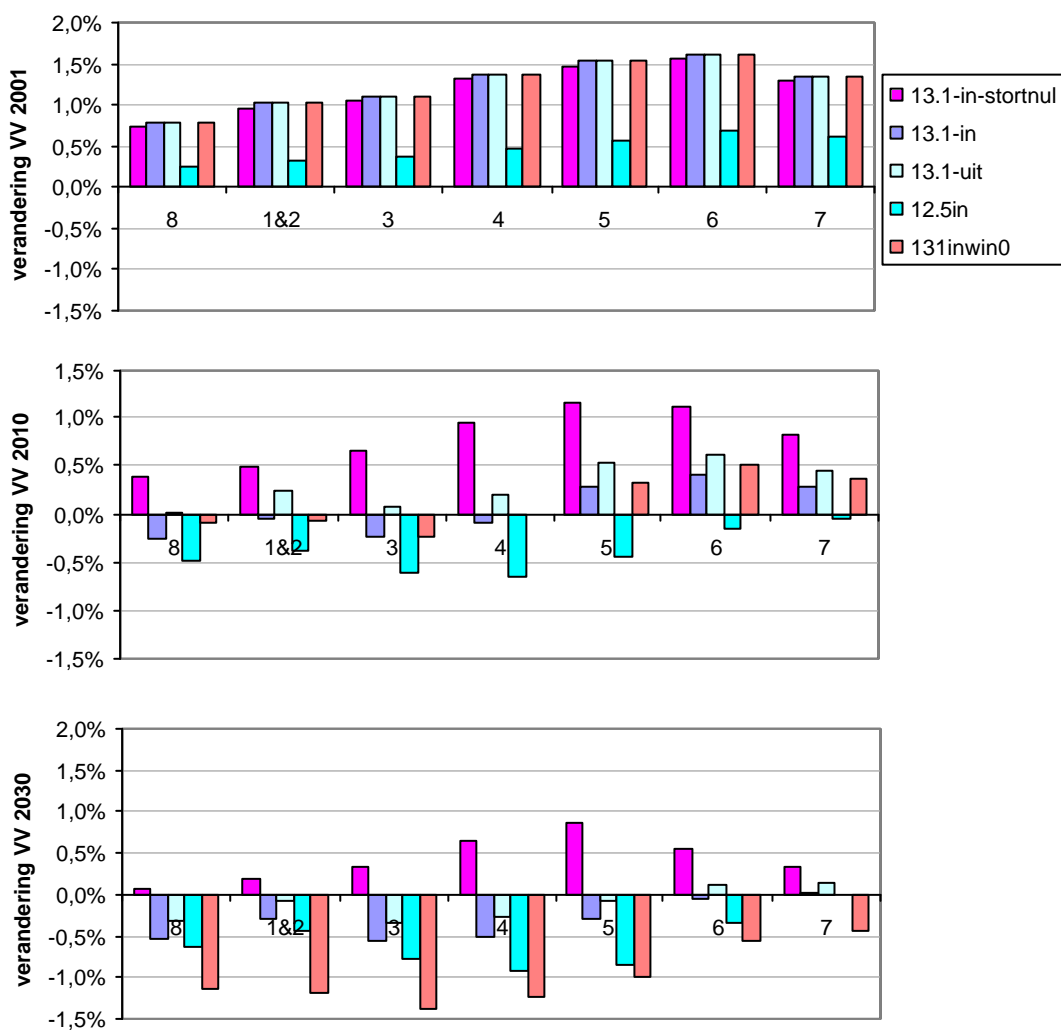
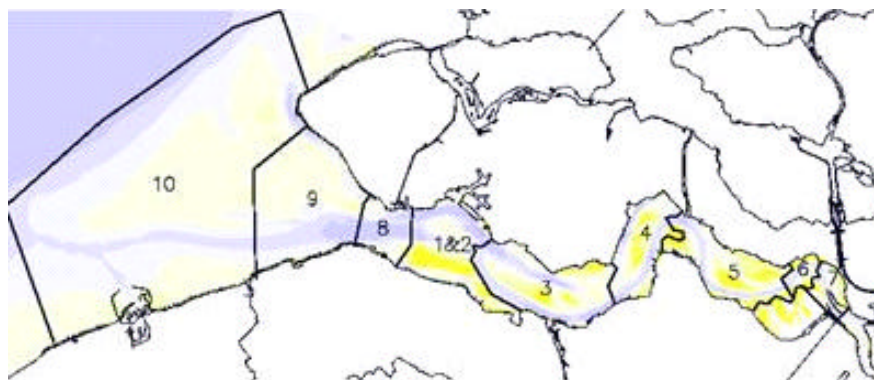


Afgeleid netto sedimenttransport 2001-2030, ESTMORF

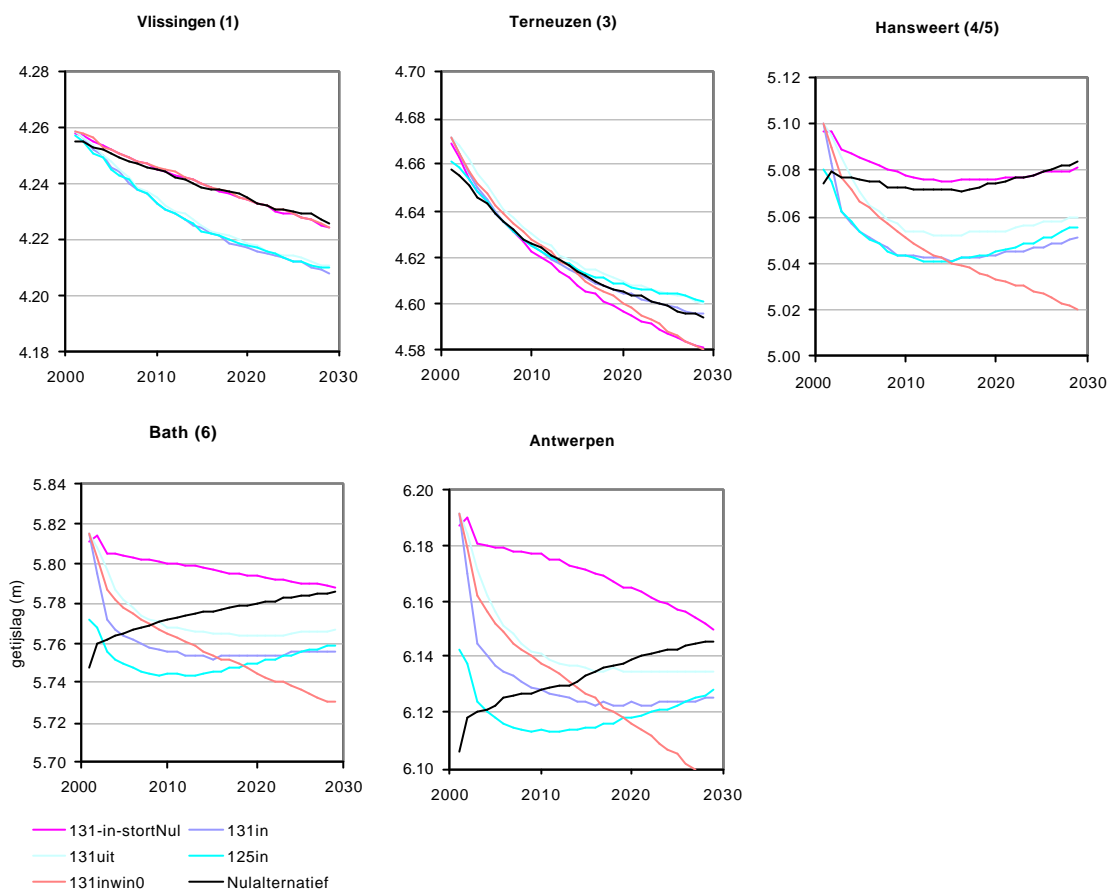


**Figuur 7-2 De zandbalans voor het nulalternatief en vijf verschillende verdieppingsalternatieven. Bovenste figuur totale netto erosie (-) en sedimentatie (+) in verschillende deelgebieden. Onderste figuur afgeleid gemiddeld sedimenttransport op de zeewaarts gelegen rand van ieder deelgebied (= zeewaarts gericht/'export', +=landwaarts gericht/'import'). 13.1-in-Nul is de variant verdieping naar een diepgang**

van 13.1 m met aanlegspecie in het estuarium gestort volgens de stortstrategie van het nulalternatief (voor verdere toelichting zie Tabel 7-1). Voor de monding (vak 9 & 10) zijn alleen de relatieve veranderingen ten opzichte van het Nul--alternatief weergegeven.



**Figuur 7-3** *Relatieve verandering in het totale vloedvolume (ten opzichte van het vloedvolume in het nulalternatief) gedurende de periode 2001-2030. In het nulalternatief neemt het vloedvolume met 3-5% toe gedurende de periode 2001-2030.*



**Figuur 7-4** *Ontwikkeling in de getijslag (gemiddeld springtij) langs het estuarium.*





---

sedimentatie (30-90% minder) in het westelijk deel van de Westerschelde (8, 1& 2 en 3).

- De landwaarts gerichte transporten in het oostelijk deel nemen met enkele procenten af. De zeewaarts gerichte transporten in de gebieden 1& 2 en 8, ter hoogte van Vlissingen nemen juist met ongeveer 10% toe ten opzichte van de variant met het storten van aanlegspecie in het estuarium.

De veranderingen in de zandhuishouding worden veroorzaakt door de veranderingen in de stortstrategie, waarbij er netto iets meer wordt gestort in het oostelijk deel (minder netto baggeren), iets meer wordt gestort in het midden deel (meer netto storten) en er minder netto wordt gestort in het westelijk deel.

Ook in de verdiepingsalternatieven met de voorlopig verbeterde stortstrategie nemen de getijslag en het vloedvolume initieel toe (zie Figuur 7-3 en Figuur 7-4). De toename in de getijslag verdwijnt echter gedurende de eerste paar jaar tot het niveau van het verdiepingsalternatief met storten volgens het nulalternatief. Met name in het oostelijk deel neemt de getijslag in tien jaar tijd af tot onder het niveau van het nulalternatief (Figuur 7-4). Dit komt doordat het gebied minder verruimt doordat er iets meer wordt gestort (minder netto baggeren). Deze veranderingen komen tot uitdrukking in de veranderingen van het vloedvolume: de vloedvolumina en het evenwichtsdoorstroomoppervlak in het oostelijk deel nemen gedurende de periode 2001-2030 wel toe maar minder dan in het nulalternatief en het verdiepingsalternatief met storten volgens het nulalternatief (zie Figuur 7-3), ondanks de iets grotere erosie van de intergetijdengebieden. Als gevolg hiervan is de verhouding tussen het werkelijke doorstroomoppervlak en het evenwichtsdoorstroomoppervlak groter (meer uit evenwicht) dan in het nulalternatief en het verdiepingsalternatief met storten volgens het nulalternatief. Dit verklaart de toename van de landwaarts gerichte transporten in het oostelijk deel ten opzichte van het nulalternatief en het verdiepingsalternatief met storten volgens het nulalternatief.

---

Ook in het westelijk deel neemt het getijvolume iets toe doordat de getijvolumina in het oostelijk deel toenemen. Het evenwichtsdoorstroomoppervlak neemt toe terwijl het werkelijke doorstroomoppervlak minder afneemt (of zelfs toeneemt) dan in het nulalternatief en het verdiepingsalternatief met storten volgens het nulalternatief. De veranderingen in het sedimenttransportrichting in gebied 3 geven aan dat hier het werkelijk doorstroomoppervlak groter is geworden dan het evenwichtsdoorstroomoppervlak. In gebied 1& 2 is de verhouding tussen het werkelijke en evenwichtsdoorstroomoppervlak weinig veranderd. De sedimentexport op de zeewaartse rand is weliswaar kleiner geworden, maar er is ook een sedimenttransport van gebied 1& 2 naar gebied 3 op gang gekomen.

Het storten van de aanlegspecie buiten het estuarium verzwakt en vertraagt de hierboven beschreven veranderingen in de getijslag en het getijvolume. Hierdoor nemen de landwaarts gerichte sedimenttransporten in het oostelijk deel iets minder toe en de zeewaarts gerichte transporten in het westelijk deel iets minder af.

### ***Verdiepen naar een diepgang van 12.5 m met storten volgens de verbeterde stortstrategie***

Vergelijken we de twee verdiepingsalternatieven '13.1-in' en '12.5-in', waarin gestort is volgens de voorlopig verbeterde stortstrategie, dan kunnen de effecten van de vereiste diepgang van de vaargeul op de zandhuishouding als volgt worden getypeerd:

- Beide verdiepingsalternatieven veroorzaken soortgelijke veranderingen van de erosie en sedimentatietendensen in de zes deelgebieden van de Westerschelde t.o.v. het nulalternatief. Dit betekent dat het grootste effect door de verandering van de stortstrategie is veroorzaakt. Met de voorlopig verbeterde stortstrategie zijn de erosie- en sedimentatiesnelheden kleiner geworden. In gebied 3 heeft de afname van de sedimentatiesnelheid bij het 12.5-in alternatief geresulteerd in een kleine erosie.
- Voor het grootschalige patroon van sedimenttransporten geldt dat de grootte van de transporten bij 12.5 m verdieping iets kleiner is dan in het 13.1 m verdiepingsalternatief.

### ***Verdiepen naar een diepgang van 13.1m zonder zandwinning***

Het effect van het afbouwen van de zandwinning, in combinatie met iets gewijzigde stortstrategie kan als volgt worden gekarakteriseerd (vergelijk de variant 13.1-in met 13.1-in-zwin0 in Figuur 7-2):

- In gebied 5, het Valkenisse-gebied in het oostelijk deel van de Westerschelde neemt de netto erosie iets af doordat de zandwinning in de vloedgeul Schaar van Waarde ter grootte van  $0.5 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  vervalt.
- In gebied 4, nabij Hansweert verandert de erosie in een netto sedimentatie door het wegvallen van de zandwinning van  $0.4 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ .
- In de gebieden 1& 2 en 3 in het westelijk deel neemt de netto sedimentatie fors toe doordat niet alleen de zandwinning in de vloedgeul Everingen van cel 3 vervalt ( $0.5 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ ), maar ook omdat er in deze gebieden  $0.9 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  extra wordt gestort. Dit sediment is afkomstig van de zandwinlocatie in de ebgeul van cel 5, die in deze berekening is veranderd in een baggerlocatie.
- De sedimentatie in gebied 8 en de relatieve sedimentatie in gebied 9& 10 van het mondingsgebied nemen toe.
- De afname van het netto baggeren en de kleinere erosie van het oostelijk deel gaan gepaard met een kleine afname van de grote landwaarts gerichte transporten op de zeewaartse rand van gebied 5.

- 
- De grotere sedimentatie in het midden en westelijk deel door de grotere netto stortingen resulteren in een toename van de zeewaarts gerichte sedimenttransporten.

Het belangrijkste mechanisme waardoor deze veranderingen op gang komen is een afname van de getijslag in het gehele estuarium gedurende de gehele periode 2001-2030. Het jaarlijks winnen van gemiddeld  $2.4\text{Mm}^3/\text{jr}$  betekent een relatieve verdieping van het estuarium die van dezelfde orde van grootte is als het effect van een relatieve zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw. Door het wegvallen van deze jaarlijkse zandwinning treedt een relatieve verondieping van het estuarium op met een afname van de getijslag als gevolg.

---

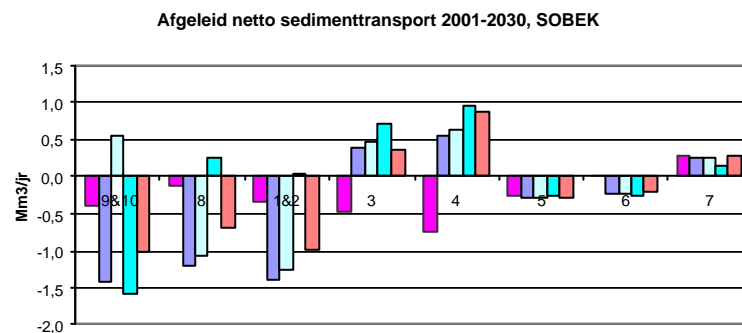
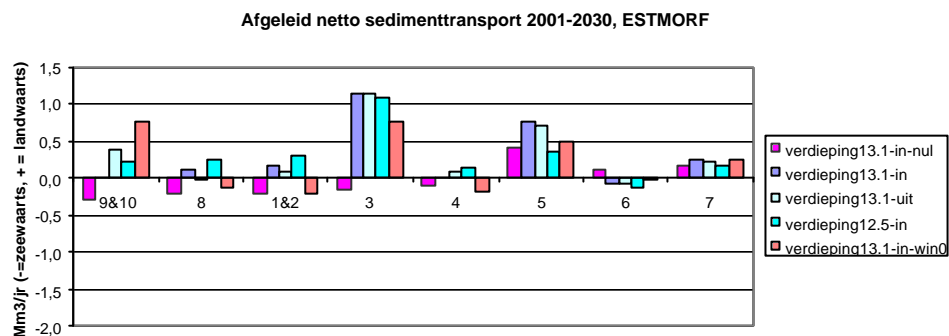
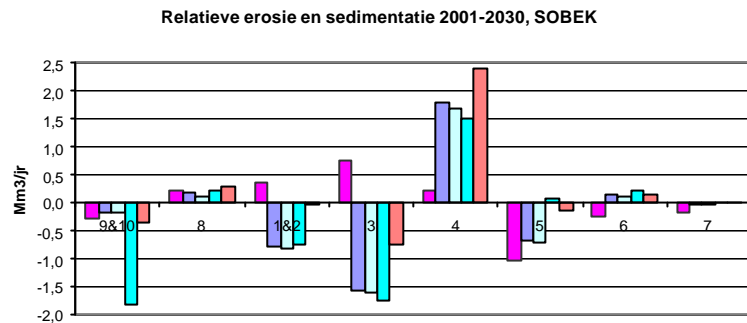
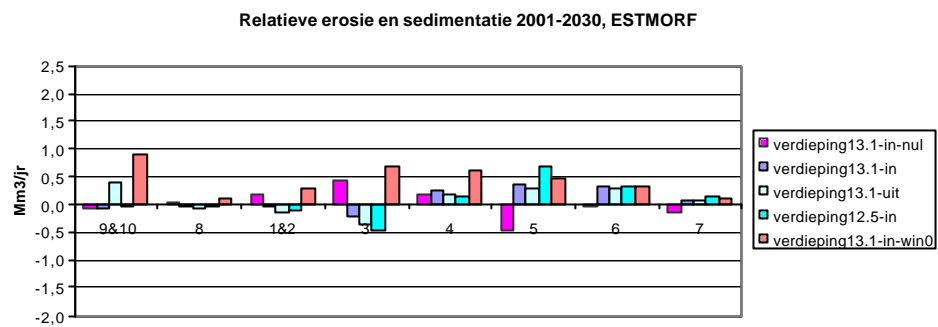
Het gevolg hiervan is weer een relatieve afname van de getijvolumina en de evenwichtsdoorstroomoppervlakten die op hun beurt resulteren in de waargenomen veranderingen van de zandhuishouding. De veranderingen manifesteren zich voornamelijk in de periode 2015-2030 (zie Figuur 7-4).

### 7.3.2 Een vergelijking met effecten volgens SOBEK en DELFT3D

#### *Een vergelijking met SOBEK*

Figuur 7-6 toont de relatieve veranderingen in de zandhuishouding volgens het ESTMORF model en het SOBEK model. De figuren tonen zowel verschillen als overeenkomsten als het gaat om het voorspellen van de effecten van de verdiepingsalternatieven op de zandhuishouding. De belangrijkste zijn:

- Grotere relatieve veranderingen volgens het SOBEK model dan het ESTMORF model. De manier waarop het teken van de relatieve veranderingen in de erosie en sedimentatiesnelheden varieert, als gevolg van een verdieping (131-in-stortnul) en een verandering in stortstrategie is in beide modellen wel vergelijkbaar. Dit geldt tot in iets mindere mate ook voor de verandering in de afgeleide sedimenttransporten.
- De veranderingen in de erosie en sedimentatiesnelheden verschillen van teken in gebied 5 en 7 en in iets mindere mate in de gebieden 1& 2 en 3:
  - In gebied 5 is er sprake van systematische verschillen tussen de modellen; de richting van de veranderingen is voor bijna alle verdiepingsvarianten tegengesteld gericht. Deze tegenstelling hangt waarschijnlijk samen met een foute voorspelling in het SOBEK model (de drempel in de vaargeul erodeert). Hierdoor is grootte van de veranderingen in afgeleide netto transporten zeewaarts van gebied vijf volgens het SOBEK model onbetrouwbaar. Deze moeten waarschijnlijk meer landwaarts (minder zeewaarts) gericht zijn.
  - In gebied 3 ontstaan verschillen in het verdiepingsalternatief zonder zandwinning. Zoals uit paragraaf 6.4 zal blijken worden deze verschillen veroorzaakt door veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem die door beide modellen verschillend worden voorspeld. Voor de verschillen in gebied 1& 2 is dit in mindere mate het geval.



**Figuur 7-6 Vergelijking van de relatieve veranderingen in de zandhuishouding volgens ESTMORF en SOBEK**

---

### ***Een vergelijking met DELFT3D***

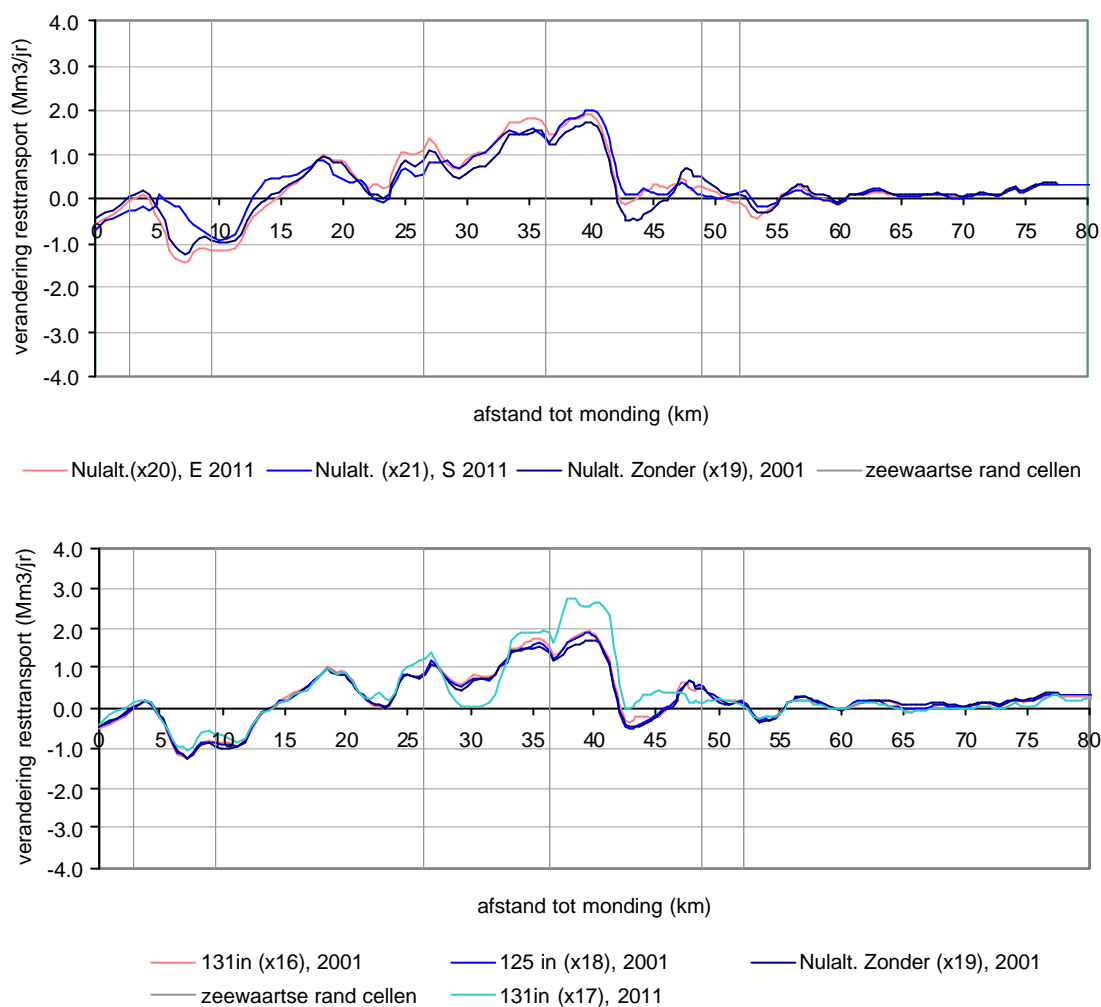
Figuur 7-7 toont de 'natuurlijke' resttransporten langs het estuarium zoals bepaald met behulp van het DELFT3D-model. Uit het bovenste figuur blijkt dat het resttransport in de Westerschelde (0-60km) grote ruimtelijke variaties kent met waarden die variëren tussen  $-3$  en  $3\text{Mm}^3/\text{jr}$ . Dit betekent dat de afgeleide sedimenttransporten in zandbalansen gevoelig zijn voor de precieze locatie van de vakgrenzen in de balans.

Het beeld van de ruimtelijke en temporele variaties in de natuurlijke resttransporten volgens het nulalternatief op basis van het DELFT3D model, laat zich als volgt karakteriseren:

- Initieel, in 2001, is er in het gebied tussen Vlissingen en Terneuzen een zeewaarts gericht resttransport. Het patroon van de resttransporten is in 2011 niet wezenlijk veranderd.
- Ter hoogte van Hansweert (km 35) heersen initieel grote landwaarts gerichte resttransporten van 2 tot  $3\text{Mm}^3/\text{jr}$  die in 2010 met 30% zijn afgenomen.
- Het oostelijk deel van de Westerschelde, vanaf km 35, wordt initieel gekenmerkt door landwaarts gerichte resttransporten. Deze resttransporten zijn in 2010 niet significant gewijzigd.
- Veranderingen in de resttransporten op basis van de bodem 2010 uit SOBEK verschillen weinig van de resttransporten gebaseerd op de 2010 bodem uit ESTMORF.

Dit beeld van de resttransporten in het nulalternatief komt kwalitatief en kwantitatief aardig overeen met het afgeleide patroon van resttransporten volgens het ESTMORF-model gedurende de periode 2001-2010 (zie Figuur 5-2).

Kijken we naar de effecten van de verdiepingsalternatieven met storten van de aanlegspecie volgens de verbeterde stortstrategie dan zijn de initiële veranderingen in de resttransporten in 2001 verwaarloosbaar klein. In 2011 zijn vooral de resttransporten nabij Hansweert (35 km) toegenomen. Halverwege macrocel 4 (30 km) zijn de vloedgedomineerde resttransporten afgenomen.



**Figuur 7-7 Verandering in de berekende natuurlijke resttransporten langs het estuarium. Vlissingen=2km, Terneuzen=20km, Hansweert=35km, Bath = 55km, Liefkenshoek=63km, Antwerpen = 70km. Voor precieze omschrijving van de DELFT3D-berekeningen zie Tabel 7-2. Een positief transport betekent een landwaarts gericht transport. Een negatief transport betekent een naar zee gericht transport ('export').**



---

### 7.3.3 Conclusie

Uit de beschouwingen van de resultaten voor de verschillende verdiepingsalternatieven blijkt dat de veranderingen in de zandhuishouding vooral worden bepaald door de wijze waarop de onderhoudsspecie wordt gestort. In totaal zijn drie verschillende strategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning beschouwd. Hanteren we deze driedeling en richten we ons op de consistenties in de resultaten tussen de verschillende modellen (paragraaf 7.3.2), dan kunnen per variant de volgende conclusies worden getrokken ten aanzien van de effecten van verdiepingen op de zandhuishouding:

- Variant 1: het verdiepen van de vaargeul naar een getijongebonden diepgang van 13.1m waarbij er wordt gestort volgens het nulalternatief leidt tot een versterking van de ontwikkelingen in de zandhuishouding zoals bepaald voor het nulalternatief. Dit betekent:
  - Een toename van de netto erosie in het oostelijk deel en de sedimentatie in het westelijk deel.
  - Een toename van de landwaarts gerichte sedimenttransporten in het oostelijk deel en de zeewaarts gerichte sedimenttransporten in het westelijk deel.
- Variant 2: verdiepen met het storten van onderhoud volgens de verbeterde stortstrategie leidt in vergelijking tot het nulalternatief tot:
  - Een kleine afname van de erosie in het oostelijke en midden deel van de Westerschelde en een verminderde netto sedimentatie in het westelijk deel van de Westerschelde. Deze veranderingen in de erosie en netto sedimentatie zijn het grootst voor het verdiepingsalternatief 12.5m.
  - Een toename van de landwaarts gerichte sedimenttransporten in het oostelijk deel en een afname van de zeewaarts gerichte sedimenttransporten in het westelijk deel. De toename van de landwaarts gerichte transporten in het oostelijk deel is het grootst in het 13.1 verdiepingsalternatief. De grootste afname van de sedimentexport ter hoogte van Vlissingen treedt op in het 12.5m verdiepingsalternatief.
  - Het bergen van de aanlegspecie buiten het estuarium heeft relatief weinig invloed op de veranderingen in de zandbalans (afgezien van het initiële effect).
- Variant 3: verdiepen naar 13.1m en het afbouwen van de zandwinning in combinatie met iets gewijzigde verbeterde stortstrategie leidt vooral tot veranderingen in de zandhuishouding van het midden en westelijk deel van de Westerschelde omdat er in deze delen netto meer wordt gestort.

Deze conclusies impliceren dat meer netto baggeren in het oostelijk deel en meer netto storten in het westelijk deel leiden tot een relatieve export van sediment in het westelijk deel van de Westerschelde. Dit betekent dat het verplaatsen van het zwaartepunt van de zandwinning van het westelijk deel naar oostelijk deel van de Westerschelde (in het begin van de jaren negentig) kan hebben geleid in de waargenomen omslag van sediment import naar sediment export. De tendens van export zou dan door de verandering van de stortstrategie sinds de tweede verdieping (meer storten in het westen), kunnen zijn versterkt. Deze hypothese zou verder moeten worden onderbouwd voordat wijzigingen in het stortbeleid en het zandwinbeleid worden doorgevoerd (zie ook Hoofdstuk 9).

---

## 7.4 Effecten op de ontwikkeling van de geulen in de Westerschelde

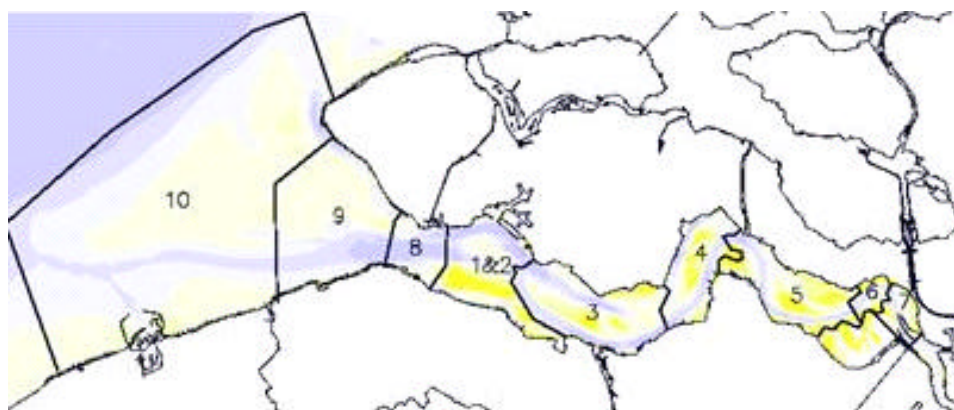
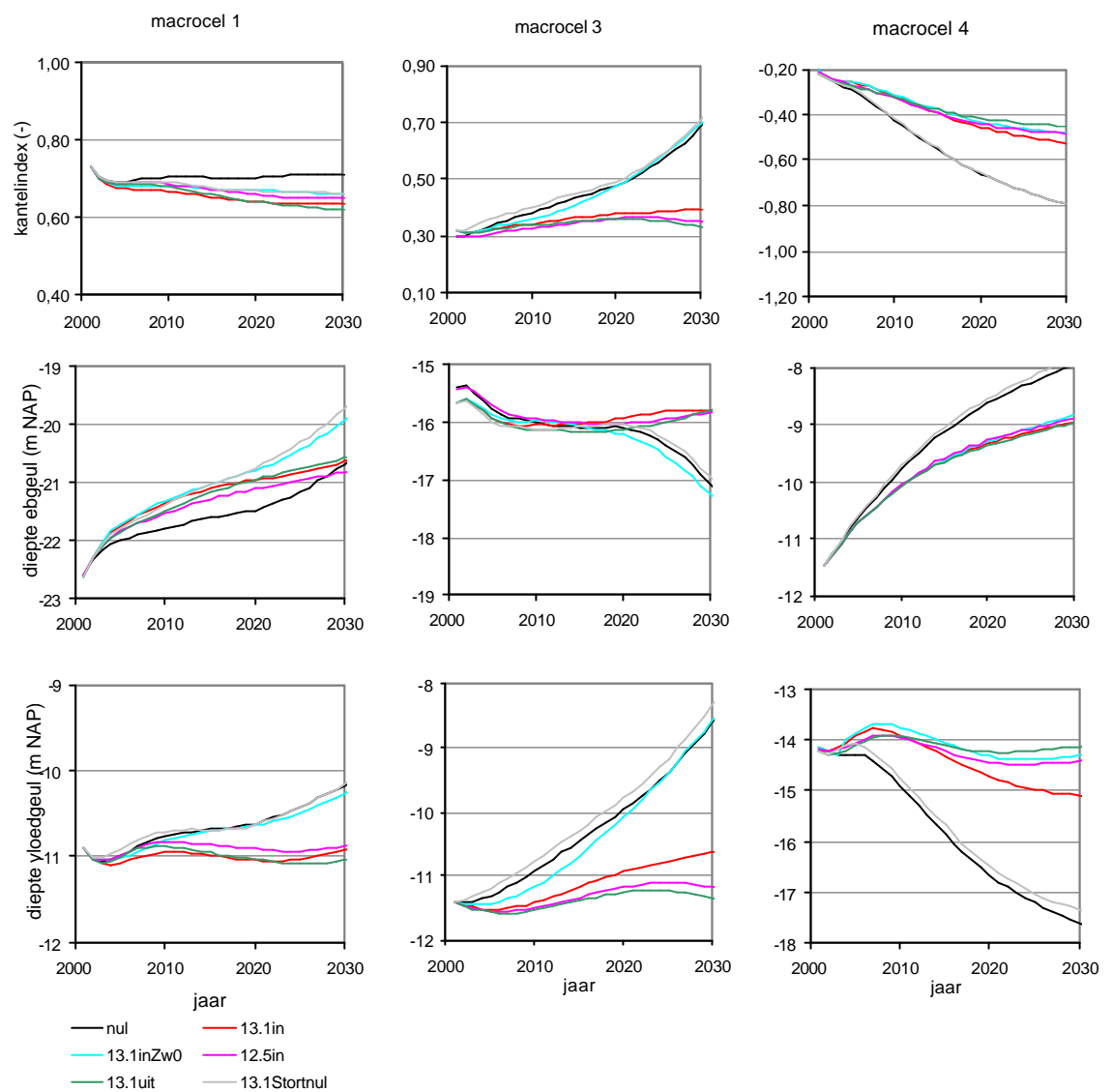
### 7.4.1 Diepteveranderingen en kantelingen van de geulen op basis van SOBEK

Figuur 7-8 laat de veranderingen in de gemiddelde diepte van de grote eb-en vloedgeulen en de kanteling van het geulsystemen in de macrocellen zien voor het nulalternatief en de verschillende verdiepingsalternatieven op basis van het SOBEK model. Veranderingen in de stabiliteit van de geulen worden gekwantificeerd met de kantelingindex. Hieruit blijkt dat de grootste verschillen tussen de diverse verdiepingsvarianten samenhangen met verschillen in de drie gehanteerde stortstrategieën: i) storten volgens het nulalternatief, ii) storten volgens de voorlopig verbeterde stortstrategie en iii) storten zonder zandwinning. De verschillen tussen het verdiepingsalternatief 12.5m en 13.1m met de voorlopig verbeterde stortstrategie zijn (verwaarloosbaar) klein in vergelijking tot de 13.1 verdiepingsalternatieven met de andere twee stortstrategieën. Vooral de verdiepingsalternatieven 'storten volgens het nulalternatief' en 'storten zonder zandwinning' leiden tot veranderingen in de stabiliteit van het geulstelsel in de macrocellen 3 en 4 die lijken op de ontwikkelingen in het nulalternatief:

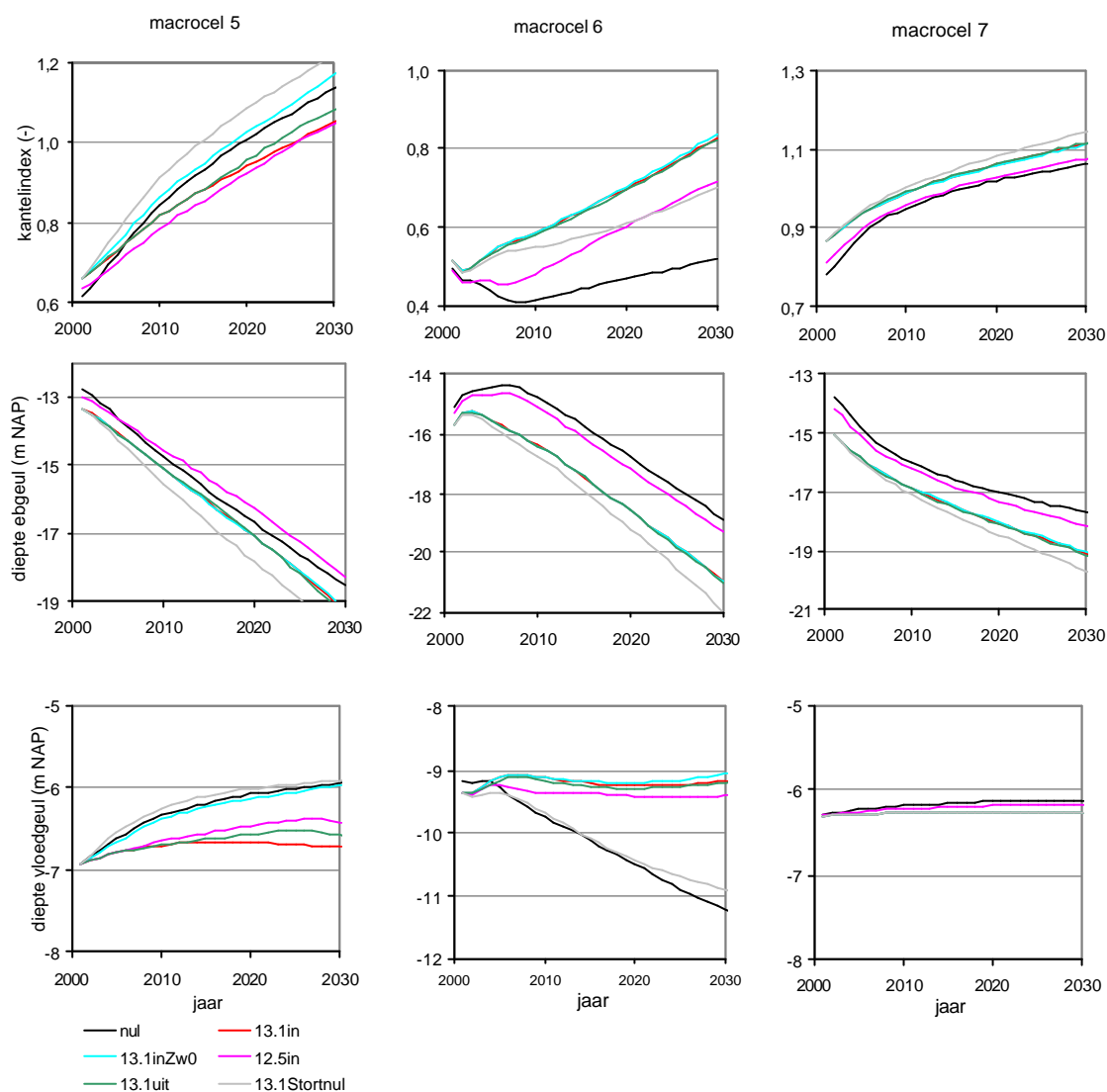
- In macrocel 3, nabij Terneuzen, kantelt het geulstelsel in beide varianten richting de vaargeul/ebgeul doordat de gemiddelde diepte van de vloedgeul Everingen onder invloed van netto storten snel verondiept (3 meter in dertig jaar).
- In macrocel 4 leidt het storten volgens het nulalternatief tot een verdieping van de vloedgeul (vaargeul) Overloop van Hansweert/Gat van Ossenis en een verondieping van de ebgeul Middelgat.

Verder verandert de stabiliteit van het geulstelsel in macrocel 6, nabij Bath, onder invloed van het verdiepen en de verbeterde stortstrategie. Door het netto storten (6v in Figuur 7-2) in de vloedgeul Schaar van de Noord behoudt de geul een min of meer constante diepte in verdiepingsvarianten met de verbeterde stortstrategie.

De stabiliteit van de geulsystemen in de macrocellen voor relatief kleine verstoringen wordt bepaald door het evenwicht tussen de transportcapaciteit van elk van de geulen onderling en van het geulstelsel als geheel. Een kleine verondieping (door storten) in één van de geulen leidt lokaal tot het vernauwen van de geuldoorsnede en daarmee tot het vergroten van de lokale stroomsnelheid, waardoor de transportcapaciteit toeneemt, en de verondieping geërodeerd wordt. Dit is een stabiele situatie. Wanneer echter de verondieping een zekere grootte overschrijdt, neemt de hydraulische ruwheid in de geul snel toe, met als gevolg dat er minder water door de verondiepte geul, en meer water door de verdiepte geul stroomt. Het gevolg is dan een afnemende transportcapaciteit in de verondiepte geul. Dit is een zichzelf versterkend proces: de verondiepte geul wordt steeds (sneller) ondieper waardoor de geul bij voldoende beschikbaar sediment kan degenereren. Dit is een instabiele situatie, die vanuit het oogpunt van de instandhouding van het dynamische meergeulensysteem niet mag optreden.



**Figuur 7-8 Diepteverandering en kanteling van de geulen in de macrocellen 1 t/m 7.**



**Figuur 7.8 vervolg.**

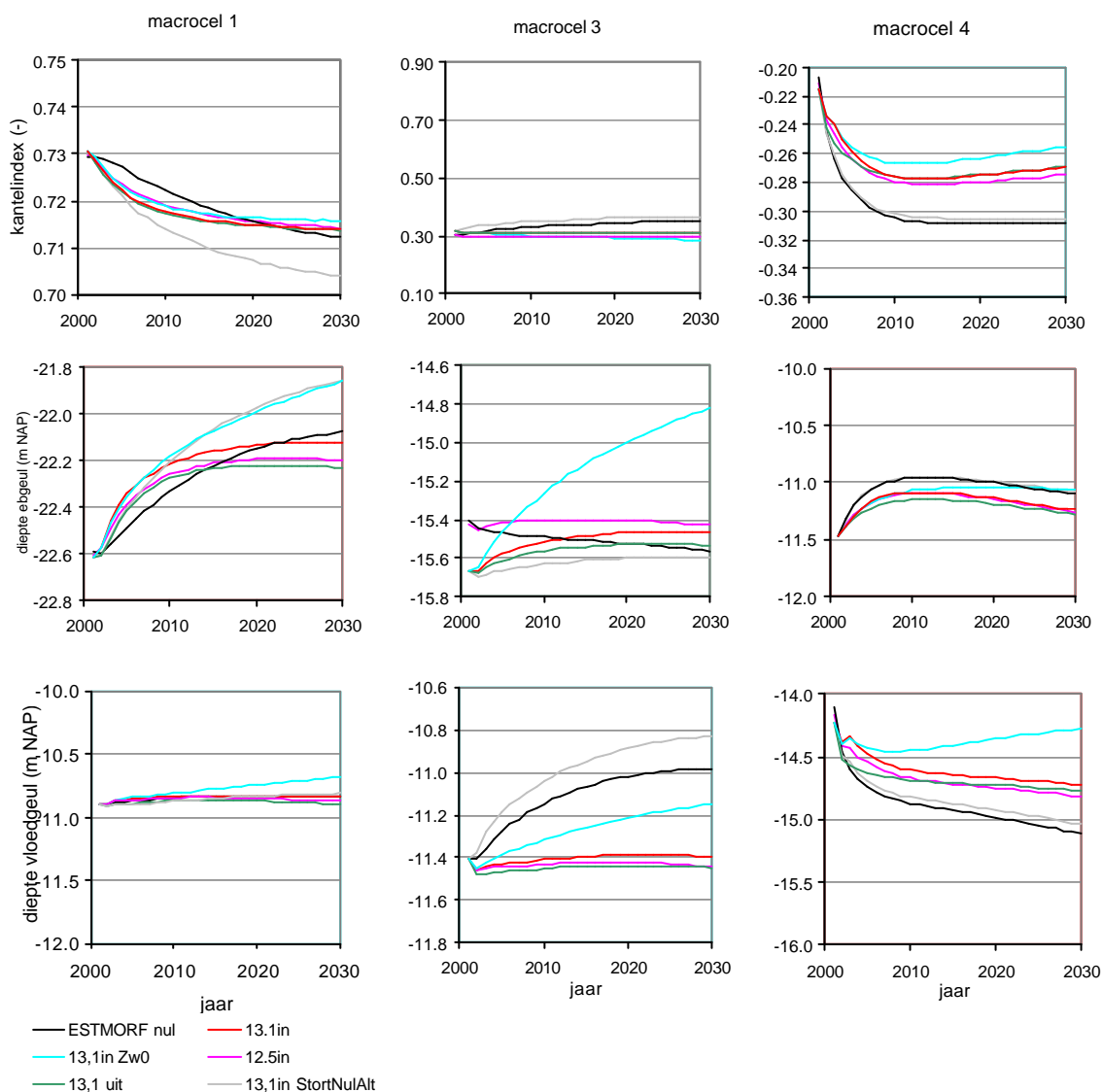
De modelresultaten geven aan dat in macrocel 3 een instabiele situatie optreedt bij de twee verdiepingalternatieven met 'storten volgens het nulalternatief' en 'verdiepen zonder zandwinning'. Het verschil in netto storten tussen beide berekeningen is echter groot (zie Figuur 7-2,  $2.9\text{Mm}^3/\text{jr}$  tegen  $0.9\text{Mm}^3/\text{jr}$ ) terwijl de morfologische respons van de vloedgeul in macrocel 3 bijna identiek is. Met het langdurig netto storten van  $0.9\text{Mm}^3$  per jaar wordt volgens het model een kritische grens overschreden waarbij de geul steeds sneller gaat verondiepen. Het feit dat bij deze vrij lage storthoeveelheden de geul toch versneld gaat verondiepen heeft te maken met de voorspelde autonome ontwikkeling waarin de geul ook zonder ingrepen op den duur gaat verondiepen. De geul heeft in het model een ander evenwicht dan in de huidige situatie. Het is niet duidelijk of dit een reële toekomstige situatie is (zie paragraaf 4.8).

Dit betekent voornamelijk dat, om de zandwinning in de Westerschelde te kunnen afbouwen in combinatie met een verdere verdieping van de vaargeul naar een diepgang van 13.1m, er een nieuwe stortstrategie moet worden bepaald.

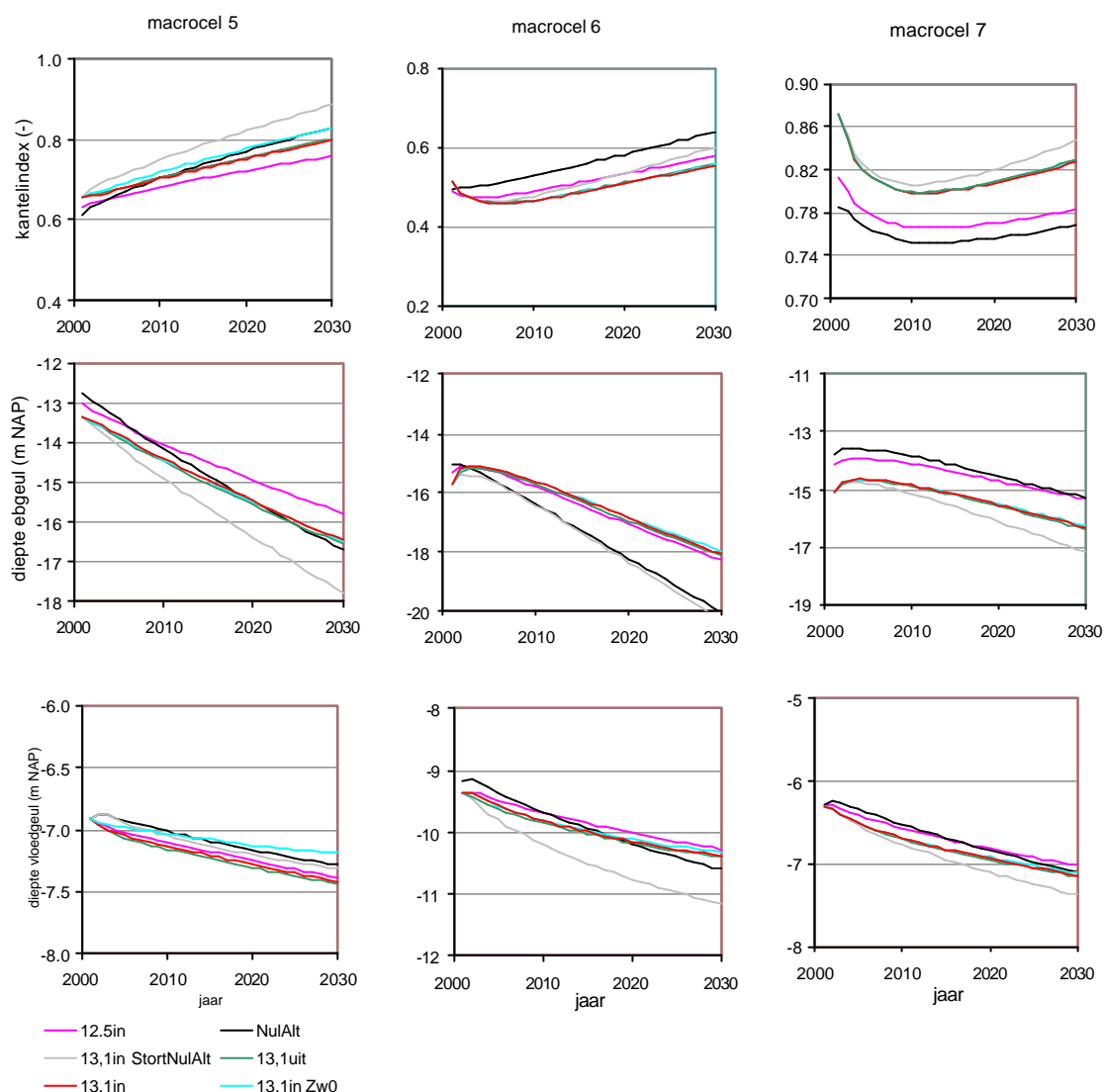
#### 7.4.2 Een vergelijking met de effecten volgens ESTMORF en DELFT3D

##### Resultaten volgens ESTMORF

Figuur 7-9 toont de diepteveranderingen en kantelingen volgens ESTMORF en SOBEK voor de verdiepingalternatieven 12.5-in en 13.1-in (beide met de voorlopig verbeterde stortstrategie en zandwinning). Bijlage E toont de erose- en sedimentatiekaarten voor de twee verdiepingalternatieven over de periode 2001-2030 volgens ESTMORF en SOBEK. Uit deze figuren komt voort dat de belangrijkste verschillen tussen beide modellen zich voordoen in de macrocel 4, en de drie macrocellen in het oostelijk deel. De wijze waarop beide modellen in deze gebieden verschillen is echter niet wezenlijk anders dan in het nulalternatief (zie 4.9 en paragraaf 4.4.3). Voor de variant zonder zandwinning en storten volgens het nulalternatief ontstaan extra verschillen tussen beide modellen in gebied 3, zoals ook geconstateerd voor het nulalternatief (Tabel 7-3).



**Figuur 7-9 Diepteveranderingen en kantelingen volgens ESTMORF**



**Figuur 7.9 Vervolg**

Tabel 7-3 geeft een kwalitatief overzicht van de mate waarin de voorspelde ontwikkelingstendensen volgens ESTMORF en SOBEK overeenkomen in de verschillende verdiepingsalternatieven. Het getal in de laatste kolom van de tabel geeft aan hoe goed de overeenkomst is tussen de resultaten van de twee modellen voor een bepaalde geul. Een groot getal (maximaal 5) geeft aan dat de twee modellen goed overeenkomen qua voorspelling van de verandering van de diepte van de betreffende geul. Uit de tabel kan worden geconcludeerd dat de twee modellen vrij goed overeenkomen voor de macrocellen 1 en 4. Opvallend is verder dat in het oostelijke deel van het estuarium (macrocellen 5, 6 en 7) de overeenkomst tussen de twee modellen goed is voor de ebgeulen maar niet goed voor de vloedgeulen. De richting waarin het geulsysteem in de gebieden 5 en 6 (richting vaargeul) kantelt komt in beide modellen wel overeen. Dit komt doordat de erosie van de ebgeulen in deze gebieden de richting van kantelen bepaalt. Voor macrocel 3 is de overeenkomst tussen beide modellen voor de voorspelde diepteverandering van de

---

vloedgeul en de ebgeul slecht, vooral voor de varianten nulalternatief, verdiepen met storten volgens het nulalternatief en verdiepen met afbouwen van de zandwinning. Dit betekent dat de onzekerheid in de voorspelde stabiliteitsprobleem in macrocel 4 bij verdiepen met voortzetting van de huidige stortstrategie (volgens nulalternatief) klein is en voor gebied 3 groot is.

De grote onzekerheid voor vooral gebied 3 wordt veroorzaakt doordat het ESTMORF model met de huidige instellingen de veranderingen in de stabiliteit als gevolg van storten niet goed kan voorspellen (zie Hoofdstuk 3). Daarom wordt voor wat betreft de stabiliteit van de geulen meer waarde gehecht aan de voorspellingen volgens SOBEK dan aan de voorspelling volgens ESTMORF.

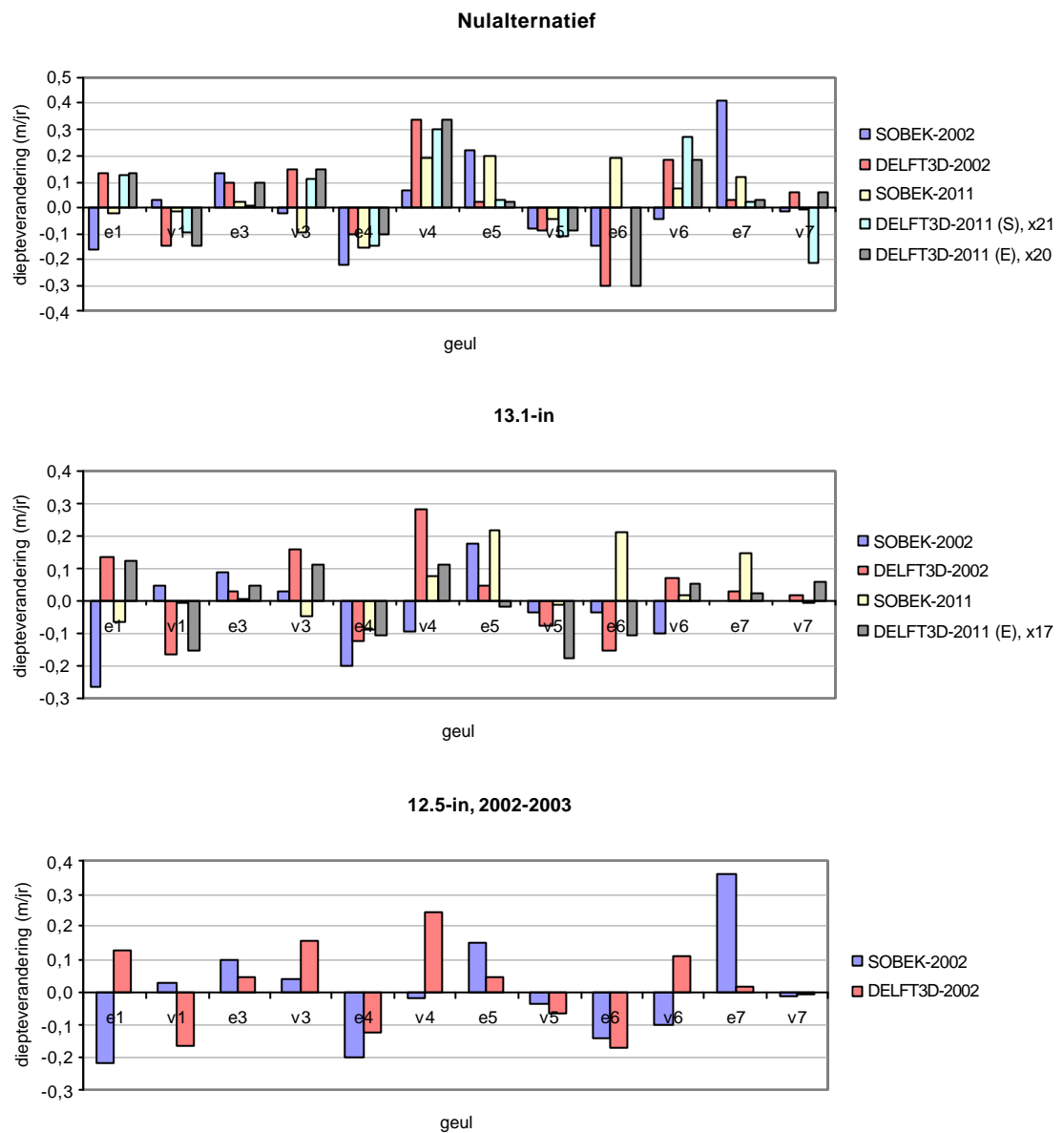
**Tabel 7-3 De mate waarin het teken van de diepteverandering in de geulen in de periode 2001-2030 volgens ESTMORF en SOBEK overeenkomen. + betekent hetzelfde teken van verandering in waterdiepte, - betekent dat de voorspelde tendensen volgens ESTMORF en SOBEK tegengesteld zijn.**

geul	13.1-in Nulalt.	13.1-in verbeterd	13.1-uit verbeterd	12.5-in verbeterd	13.1-in- zwin0, verbeterd 2	aantal +
e1	+	+	+	+	+	5
v1	+	-	0	+	+	3
e3	-	-	-	0	-	0
v3	-	-	-	-	-	0
e4	+	+	+	+	+	5
v4	+	+	-	+	+	4
e5	+	+	+	+	+	5
v5	-	-	-	-	-	0
e6	+	+	+	+	+	5
v6	+	-	-	0	-	1
e7	+	+	+	+	+	5
v7	0	0	0	-	0	0
aantal +	9	6	5	7	8	

#### **Resultaten volgens DELFT3D**

Figuur 7-10 toont een vergelijking van de jaarlijkse diepteveranderingen in 2002 en 2010 volgens SOBEK en DELFT3D. Hieruit blijkt dat de orde van grootte en de richting van de veranderingen in de gemiddelde waterdiepte volgens beide modellen verschillen en overeenkomsten vertonen. Concentreren we ons op het teken van de diepteverandering dan kunnen de overeenkomsten en verschillen worden gekwalificeerd volgens Tabel 7-4. Het aantal keren dat de tekens per geul (max. 6 berekeningen) en in een variant overeenkomen (maximaal 12 geulen) kan geworden geïnterpreteerd als een semi-kwantitatieve maat voor de onzekerheid: hoe groter het aantal plussen hoe kleiner de onzekerheid. Uit de tabel blijkt dat de grootste onzekerheden zich voor doen in de eb en vloedgeul van macrocel 1 en de vloedgeulen van de macrocellen 3, 6 en 7 (maximaal rie plussen) en in de variant 13.1-in in 2002.





**Figuur 7-10** Vergelijking van de initiële diepteveranderingen SOBEK en DELFT3D. Een negatieve diepteverandering betekent een afname van de waterdiepte (sedimentatie). Een positieve diepteverandering betekent een toename van de waterdiepte (erosie).

**Tabel 7-4 Kwalificatie van de overeenkomst in de voorspelde diepteverandering volgens SOBEK en DELFT3D**

Geul	2002-Nulalt.	2011-Nulalt. SOBEK.	2011-Nulalt. ESTMOR F	2002-13.1	20011-13.1	2002-12.5	Aantal +
e1	-	-	-	-	-	-	0
v1	-	+	+	-	+	-	3
e3	+	+	+	+	+	+	6
v3	-	-	-	+	-	+	2
e4	+	+	+	+	+	+	6
v4	+	+	+	-	+	-	4
e5	+	+	+	+	-	+	5
v5	+	+	+	+	+	+	6
e6	+	0	+	+	-	+	5
v6	-	+	+	-	+	-	3
e7	+	+	+	0	+	+	5
v7	-	+	-	0	-	-	1
aantal +	7	9	9	6	7	7	

Een kenmerk van het meergeulensysteem is de aanwezigheid van residuele sedimentcirculaties met overwegend vloedgedomineerde resttransporten in de vloedgeulen en ebgedomineerde resttransporten in de ebgeulen van de macro- en mesocellen. De initiële DELFT3D-berekeningen geven inzicht in hoeverre en op welke wijze deze restcirculaties veranderen als gevolg van het verdiepen. Figuren met de restcirculaties in het nulalternatief en relatieve veranderingen in deze restcirculaties t.b.v. de verdiepingsalternatieven in 2001 zijn opgenomen in Figuur F. 1 t/m Figuur F. 6 van bijlage F. Hieruit blijkt dat de eb- en vloedgedomineerde resttransporten in het westelijke en midden deel, de macrocellen 1, 3 en 4, van de Westerschelde toenemen. In de gebieden 5 en 6 in het oostelijk deel nemen de resttransporten af en in gebied 7 nabij de grens nemen de eb- en vloedgedomineerde resttransporten iets toe.

#### 7.4.3 Implicaties voor de aanwezigheid van kortsluitgeulen

Zoals uiteengezet in Hoofdstuk 5 (paragraaf 5.5) worden er in het nulalternatief alleen veranderingen in de aanwezigheid van de kortsluitgeulen verwacht in gebied 3, het geulstelsel van de Everingen en de Pas van Terneuzen, nabij Terneuzen. In dit geulstelsel zal de aanwezigheid (grootte en/of aantal) van de kortsluitgeulen afnemen. Deze verwachting is gebaseerd op de voorspelde verondieping van de vloedgeul Everingen als gevolg van het netto storten in deze geul en fenomenologische kennis van het estuarium.

Vergelijken we de voorspelde veranderingen in de stabiliteit van de macrocellen voor de verschillende verdiepingsalternatieven met de ontwikkelingen in het nulalternatief, dan impliceert dit de volgende veranderingen in de aanwezigheid van de kortsluitgeulen:

- Het verdiepingsalternatief 13.1 met storten volgens het nulalternatief resulteert in een versterking van de ontwikkelingstendensen in het nulalternatief. Dit betekent dat in deze verdiepingsvariant de aanwezigheid van kortsluitgeulen in gebied 3 eveneens zal afnemen.

- In de verdiepingsalternatieven 13.1 en 12.5 met storten volgens de verbeterde stortstrategie veranderen de gemiddelde diepte van de eb- en vloedgeul in gebied 3 weinig. Hierdoor zal de aanwezigheid van de kortsluitgeulen in gebied 3 toenemen ten opzichte van het nulalternatief. In gebied 6, nabij Bath verandert de stabiliteit van de macrocel doordat de vloedgeul stabiel blijft (sedimenteert ten op zichten van het nulalternatief) en de ebgeul verdiept. Hierdoor zouden de vage contouren van een kortsluitgeul kunnen verdwijnen.
- In het verdiepingsalternatief zonder zandwinning treden in gebied 3, nabij Terneuzen dezelfde ontwikkelingen op als in het nulalternatief en het verdiepingsalternatief met storten volgens het nulalternatief. De aanwezigheid van de kortsluitgeulen in gebied 3 zal afnemen. Een verdere aanpassing van de voorlopig verbeterde stortstrategie laat zien dat deze ontwikkelingen in gebied 3 waarschijnlijk wel te mitigeren zijn door aanpassingen in de stortstrategie.

#### **7.4.4 Conclusies**

Uit de voorgaande beschouwingen kan worden geconcludeerd dat de veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem vooral worden bepaald door de gehanteerde stortstrategie en de relatief geringe toename van het onderhoudsbaggerwerk bij verder verdiepen. Het verdiepen met storten volgens de voorlopig verbeterde stortstrategie resulteert in een grotere stabiliteit van de geulen dan in het nulalternatief (dit is een verbetering). Verdiepen zonder zandwinning in de Westerschelde leidt tot vergelijkbare knelpunten/veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem in macrocel 3 als in het nulalternatief. Dit betekent dat verdere aanpassingen van de stortstrategie nodig zijn om de zandwinning te kunnen stoppen. Hierbij moet de invloed van de stortstrategie, de baggerstrategie (in deze studie niet beschouwd) en de zandwinning op de zandhuishouding (zandbalans), de stabiliteit van het meergeulensysteem en het onderhoudsbaggerwerk integraal worden beschouwd.

De grootste onzekerheden in deze conclusie komen voort uit het feit dat de conclusie grotendeels is gebaseerd op resultaten uit het SOBEK model dat niet is gevalideerd en waarvan de voorspelkracht dus niet bekend is. Hierdoor is het mogelijk dat de absolute morfologische ontwikkeling van de geulen in het nulalternatief niet juist is. De verwachting is echter dat de voorspelde trends in de kritische gebieden 3 en 4 in het nulalternatief wel juist zijn. De effecten van de verdieping worden geëvalueerd ten opzichte van het nulalternatief, een relatieve beschouwing. Hierdoor zullen de onzekerheden in de relatieve effecten kleiner zijn dan de absolute effecten. Hoeveel kleiner is op dit moment niet te zeggen.

### **7.5 Effecten op de ontwikkeling van het intergetijdengebied in de Westerschelde**

#### **7.5.1 Veranderingen op basis van ESTMORF**

Figuur 7-10 toont de veranderingen van de intergetijdengebieden ten opzichte van de vaste referentieniveaus NAP-2m en NAP+3.5m. De veranderingen ten opzichte van het niveau van laagwater en hoogwater niveau (in de tijd en ruimte variërende referentievlakken) zijn weergegeven in Figuur 7-11, omdat dit een juistere definitie is van het fenomeen intergetijdengebied en omdat de veranderingen met variabele referentieniveaus in het nulalternatief anders zijn dan met vaste referentieniveaus (zie Hoofdstuk 4). Dit blijkt ook

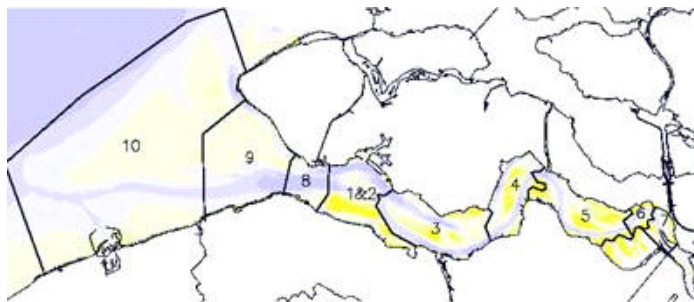
---

het geval te zijn als het gaat om het voorspellen van de effecten van verdiepen omdat de getijslag verandert. De volgende veranderingen kunnen worden waargenomen:

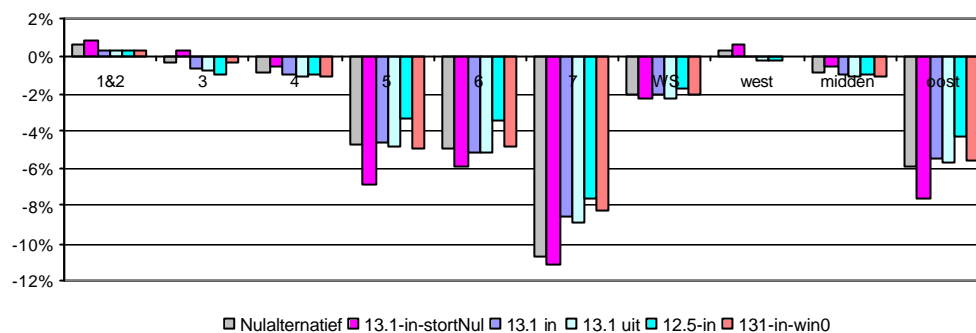
In het oostelijk deel van de Westerschelde, de gebieden 5, 6 en 7, resulteert een verdieping met storten volgens het nulalternatief tot een relatieve erosie (ten opzichte van nulalternatief). Verdiepen met storten volgens de verbeterde stortstrategie en eventueel het afbouwen van de zandwinning leidt tot geen afname of een relatieve opbouw van het intergetijdengebied. Wanneer de intergetijdengebieden ten opzichte van laagwater en hoogwater worden beschouwd is dit beeld anders: In het oostelijk deel als geheel leiden alle vijf verdiepingsvarianten tot een (kleine) extra erosie van het intergetijdengebied. De relatieve erosie in de verdiepingsvarianten met de voorlopig verbeterde stortstrategie is het gevolg van een afname van de getijslag (zie Figuur 7-4). Vooral in het oostelijk deel zal een erosie van de intergetijdengebieden zich vooral manifesteren op de platen omdat de slikken op de meeste plaatsen op een moeilijk erodeerbaar pakket van veen liggen (de Jong pers. com.).

In het midden en westelijk deel van de Westerschelde zijn de voorspelde veranderingen van de intergetijdengebied klein, waarbij de definitie van de intergetijdengebieden veel invloed heeft op het teken en de absolute grootte van de veranderingen. Beschouwen we de veranderingen ten opzichte van het nulalternatief (relatieve beschouwing) dan eroderen de intergetijdengebieden in het westelijk deel bij de verdiepingsalternatieven met verbeterde stortstrategie. Dit geldt voor zowel de vaste als de variabele definitie. In het midden deel treedt een relatieve erosie op van de intergetijdengebieden tussen NAP-2m en NAP+3.5m. Bij een variabel referentieniveau zijn de kleine effecten voor de verschillende varianten wisselend.

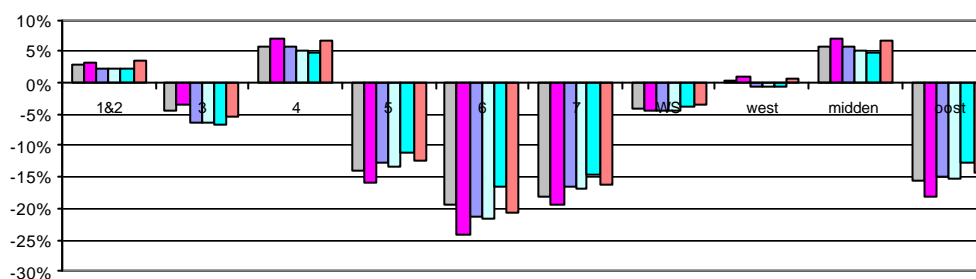
Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de effecten van de verdieping op de ontwikkeling sterk afhankelijk is van de definitie van de intergetijdengebieden. Bij een vaste referentie is er sprake van een relatieve opbouw van de intergetijdengebieden in het oostelijk deel en een erosie in het midden en westelijk deel van de Westerschelde. Wanneer wordt uitgegaan van een variabele referentie betekent verdiepen een relatieve erosie in het oostelijke en westelijk deel (door de afname van de getijslag) en overwegend sedimentatie in het middendeel.



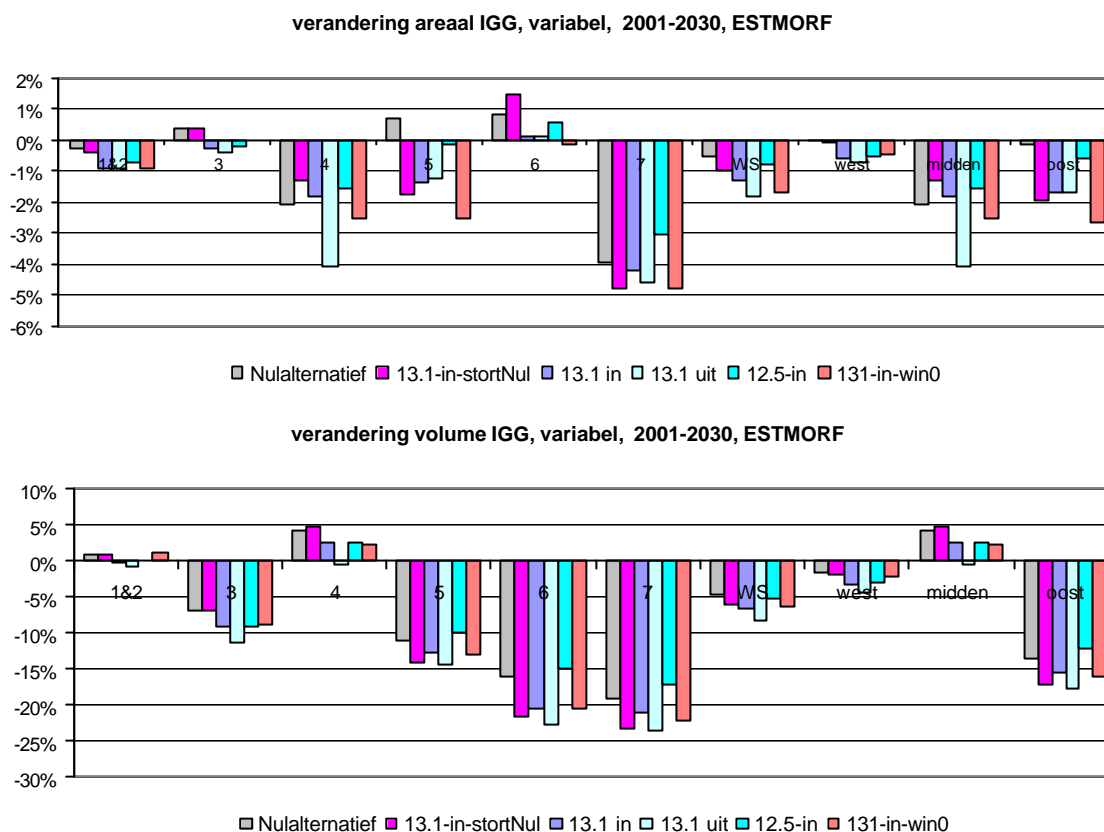
verandering areaal IGG, vast, 2001-2030, ESTMORF



verandering volume IGG, vast, 2001-2030, ESTMORF



**Figuur 7-11 veranderingen van het areaal en volume intergetijdengebied tussen NAP-2m en NAP+3.5m.**



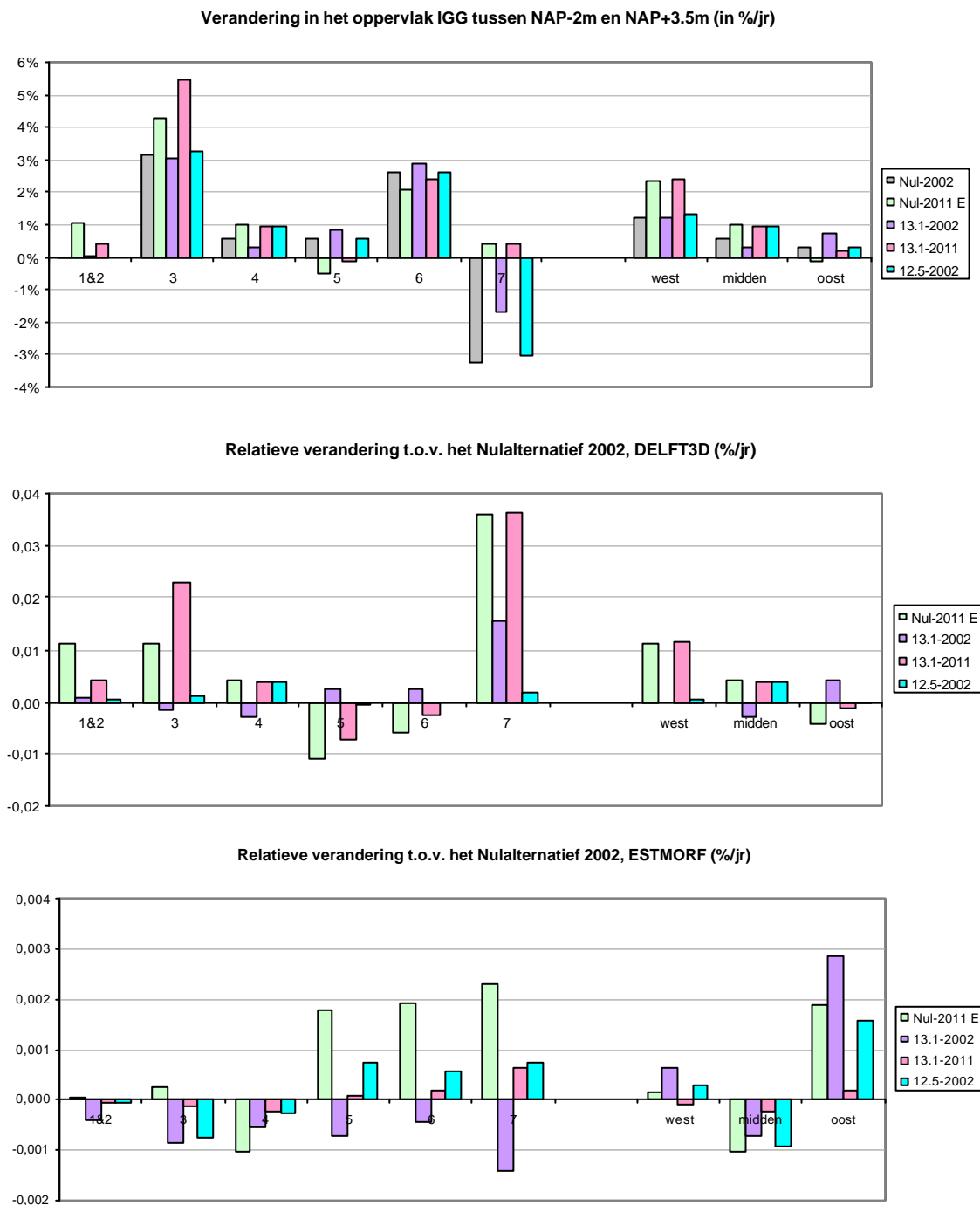
**Figuur 7-12 Veranderingen van het areaal intergetijdengebied tussen laagwater en hoogwater.**

### 7.5.2 Een vergelijking met DELFT3D

Met het DELFT3D model zijn de initiële veranderingen voor het nulalternatief (x19, x20) en de verdiepingsalternatieven '13.1-in' (x16) en '12.5-in' (x18) bepaald. Deze worden in Figuur 7-12 getoond in absolute en relatieve zin (t.o.v. nulalternatief 2002). In het onderste deel van de figuur worden de relatieve veranderingen (t.o.v. nulalternatief in 2002) volgens het ESTMORF model voor dezelfde jaren weergegeven. Een vergelijking van de resultaten toont meer verschillen dan overeenkomsten (zie Tabel 7-5). Dit geeft aan dat de onzekerheden in de voorspelde areaalveranderingen groot zijn, groter dan in de voorspelde zandbalansen en groter dan de voorspelde veranderingen in de diepte en stabiliteit van de geulen. Bij de vergelijking tussen DELFT3D en ESTMORF moeten de volgende kanttekeningen worden geplaatst:

- ESTMORF is een gekalibreerd model, terwijl DELFT3D dat niet is. Op de simulatie tijdschaal van 1 jaar zijn processen zoals geulmigratie niet van wezenlijk belang voor de gesimuleerde veranderingen in het areaal intergetijdengebied.
- De veranderingen volgens DELFT3D zijn een orde van grootte groter dan de veranderingen volgens ESTMORF. Daarnaast voorspelt het DELFT3D model relatief meer sedimentatie. Dit laatste komt mogelijk doordat golven als plaatafbraak - mechanisme niet in het DELFT3D-model zitten (voor ESTMORF is dit geen issue).

Dit pleit er voor om voor het voorspellen van de effecten vooralsnog uit te gaan van de ESTMORF-resultaten, waarbij de onzekerheden groot zijn.



**Figuur 7-13** Initiële veranderingen in het areaal intergetijdengebied volgens DELFT3D (%/jr). Bovenste figuur absolute veranderingen. Onderste figuur relatieve veranderingen. Indeling in vakken is hetzelfde als in Figuur 7-10.

**Tabel 7-5 Kwalificatie van de overeenkomst in de voorspelde diepteverandering volgens ESTMORF en DELFT3D. + betekent dat het teken in Figuur 7-12 overeenkomt, - betekent dat het teken tegengesteld is en 0 betekent dat een van beide modellen geen verandering voorspelt en het andere model wel. Minder dan 3 plussen per variant betekent een grote onzekerheid. Minder dan 2 plussen per gebied betekent ook een grote onzekerheid in de voorspellingen.**

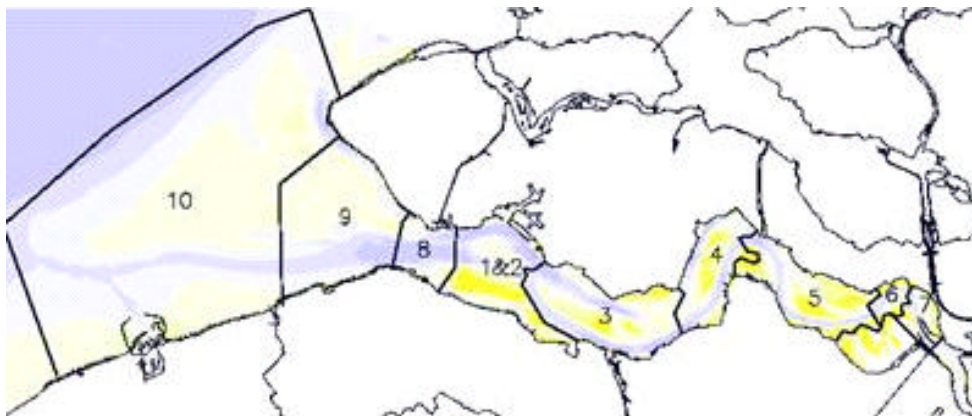
Gebied	2011- Nulalt. ESTMORF- bod.	2002-13.1	20011-13.1	2002-12.5	aantal +
1&2	+	-	-	-	1
3	+	+	-	-	2
4	-	+	-	-	1
5	-	-	-	-	0
6	-	-	-	0	0
7	+	-	+	+	3
aantal +	3	2	1	1	

## 7.6 Effecten op de ontwikkeling van het ondiepwatergebied

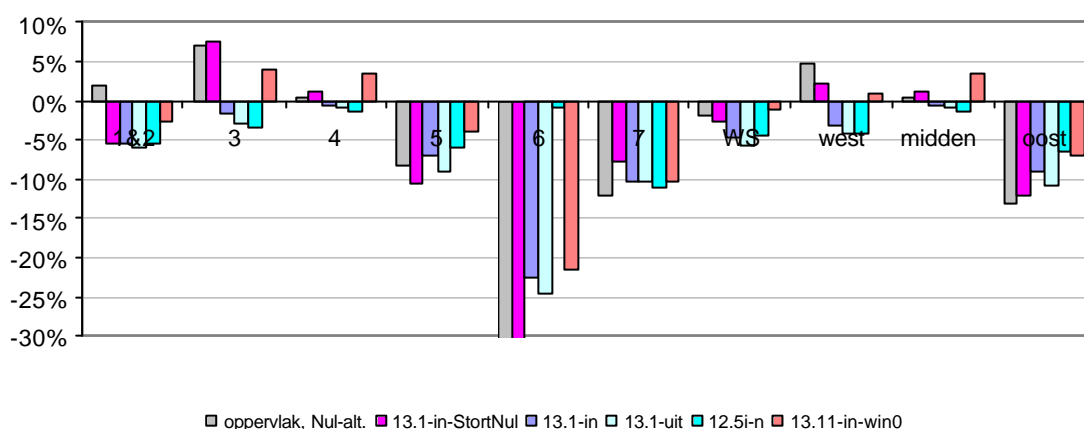
### 7.6.1 Indicatieve veranderingen volgens ESTMORF

De bodemveranderingen 2001-2030 volgens het ESTMORF-model zijn vertaald naar het rooster van het DELFT3D model om een indicatie te krijgen van de veranderingen in het ondiepwatergebied als gevolg van het verdiepen. De resultaten zijn samengevat in Figuur 7-13.





Procentuele verandering areaal OG , 2001-2030



**Figuur 7-14 Indicatieve veranderingen in het areaal Ondiepwatergebied volgens ESTMORF**

Uit Figuur 7-13 kunnen de volgende tendensen worden afgeleid:

- Voor de Westerschelde neemt het areaal ondiepwatergebied af in alle alternatieven. De totale afname is het grootst bij de drie alternatieven met de voorlopig verbeterde stortstrategie (13.1-in, 13.1-uit, 12.5-in).
- Volgens de berekeningen treedt het verlies vooral op in het oostelijk deel van de Westerschelde (gebieden 5, 6 en 7). In dit deel veroorzaken het nulalternatief en het verdiepingsalternatief '13.1-in-nul' de grootste afname van het ondiepwatergebied.
- Volgens de meeste berekeningen, uitgezonderd de variant '13-in-zwin0', verandert het areaal ondiepwatergebied in het middendeel weinig. Het afbouwen van de zandwinning leidt tot een toename van het areaal ondiepwatergebied.
- In het westelijk deel van de Westerschelde gaan het nulalternatief en de verdiepingsvariant '13.1-in-nul' gepaard met een toename van het areaal van ondiepwatergebied. De varianten met de voorlopig verbeterde stortstrategie veroorzaken een verlies van het ondiepwatergebied in dit deel van het estuarium. De berekening zonder zandwinning voorspelt een toename van het ondiepwatergebied.

Ten aanzien van de effecten van verdiepen en de effecten van de stortstrategie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- 
- De verdieping van de vaargeul op zich heeft niet veel invloed op de ontwikkeling van het areaal ondiepwatergebied. Dit blijkt uit zowel de vergelijking tussen de twee berekeningen met de stortstrategie volgens het nulalternatief, als uit de vergelijking tussen de drie berekeningen met de verbeterde stortstrategie en de variant zonder zandwinning.
  - De invloed van de stortstrategie op de ontwikkeling van het ondiepwatergebied is veel groter. Relatief meer storten in een bepaald gebied leidt tot een toename c.q. verminderde afname van het areaal ondiepwatergebied, volgens de berekeningen. Dit blijkt uit de vergelijking tussen de berekeningen met de verschillende stortstrategieën, en ook het effect van de variant waarin de zandwinning wordt afgebouwd.

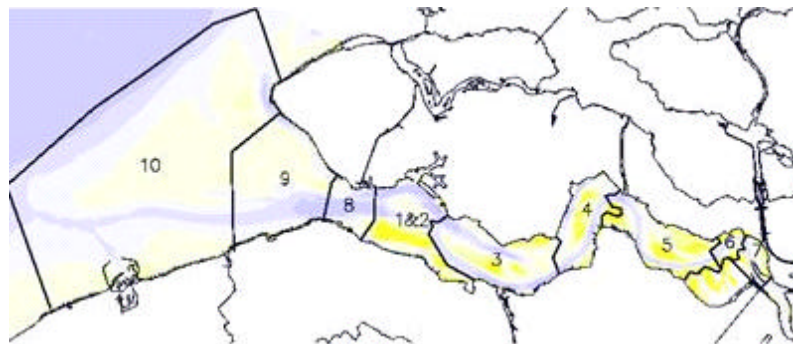
Zoals geconstateerd in paragraaf 5.7 hangen de voorspelde veranderingen in het areaal ondiep watergebied vooral samen met het netto eroderen of sedimenteren van de geulen in een macrocel, en in mindere mate met de ontwikkeling van de intergetijdengebieden. In gebieden waar een afname van het areaal ondiepwatergebied optreedt wordt vaak ook een afname van het areaal intergetijdengebied voorspeld, en omgekeerd. Dit betekent dat het verlies van het ondiepwatergebied niet een gevolg is van het omzetten van het ondiepwatergebied in intergetijdengebied. Er bestaat wel een relatie tussen het verlies van ondiepwatergebied en de zandhuishouding: in een gebied waar volgens een bepaalde berekening netto erosie optreedt wordt vaak ook een verlies van het areaal ondiepwatergebied voorspeld.

Tot slot wordt opgemerkt de voorspelling van het ondiepwatergebied is gebaseerd op indirecte resultaten. In ESTMORF worden alleen de totale veranderingen in het geuldeel, het lage intergetijdengebied en het hoge intergetijdengebied berekend. De veranderingen van het ondiepwatergebied kunnen alleen via de vertaling van de ESTMORF veranderingen naar het DELFT3D rooster worden bepaald. Dit kan extra onzekerheden in de resultaten veroorzaken.

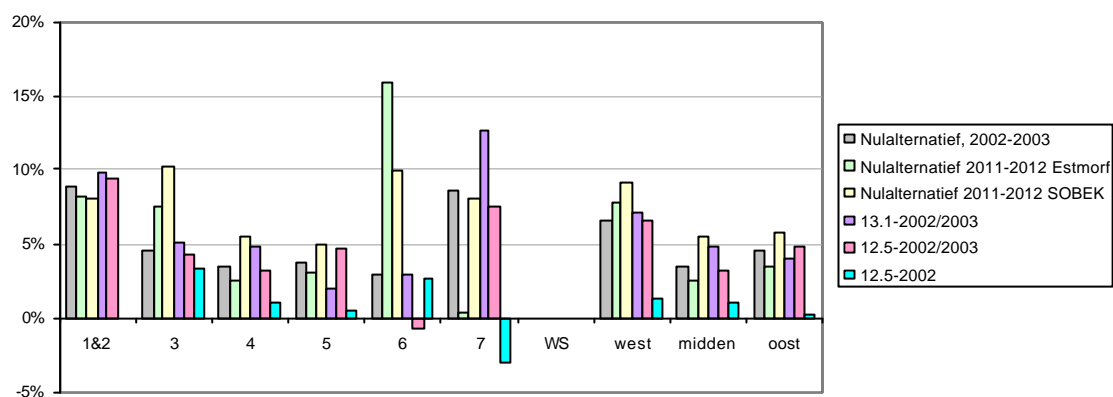
### **7.6.2 Een vergelijking met indicatieve initiële veranderingen op basis van DELFT3D**

Figuur 7-14 toont de voorspelde initiële veranderingen in het ondiepwatergebied volgens DELFT3D. In tegenstelling tot de langetermijn veranderingen (2001-2030) zoals voorspeld door ESTMORF, voorspelt het DELFT3D model op kortetermijn overwegend uitbreidingen van het ondiepwatergebied die duidelijk groter zijn dan de langetermijn veranderingen in ESTMORF. De overeenkomst wordt ook niet duidelijk beter wanneer de resultaten op een relatieve manier worden beschouwd (alles t.o.v. het nulalternatief).

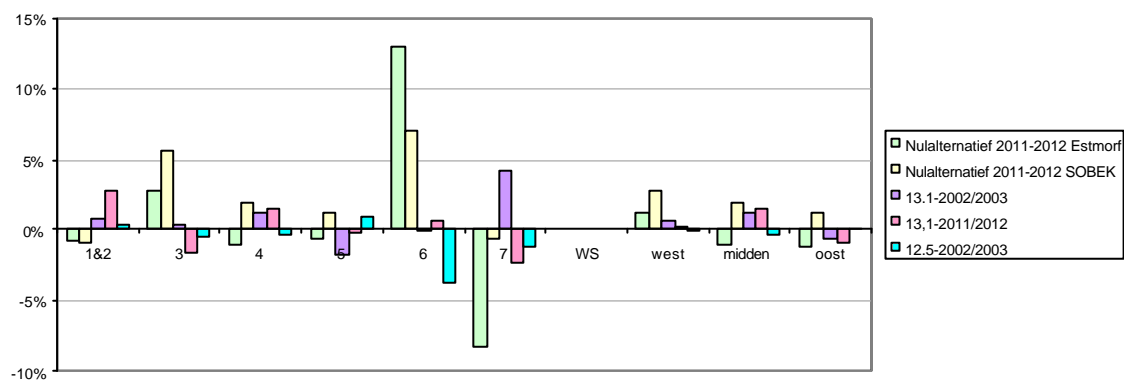
De grote verschillen tussen de resultaten van de twee modellen laten zien dat er grote onzekerheid bestaat in de voorspelling van de ontwikkelingen van het areaal ondiepwatergebied. Opgemerkt wordt dat alle gebruikte modellen eigenlijk niet goed geschikt zijn voor dit doeleinde. Het ESTMORF model is niet geschikt omdat het model het hele geulgedeelte als een geheel behandelt en dus geen onderscheid maakt tussen ondiepwater en diepwater. Het DELFT3D model zou in theorie geschikt zijn maar het model is nog niet morfologische gekalibreerd, en zeker niet met betrekking tot dit aspect. In het verleden is gebleken dat na de eerste verdieping van de vaargeul vooral afname van het areaal van het ondiepwatergebied was opgetreden. Op basis hiervan wordt vermoed dat de door ESTMORF voorspelde afname realistischer lijkt dan de door DELFT3D voorspelde toename.



Verandering in het oppervlak OG tussen NAP-2m en NAP-5m (in %/jr)



Verandering in het oppervlak OG tussen NAP-2m en NAP-5m (in %/jr)



**Figuur 7-15** Initiële veranderingen in het ondiepwatergebied volgens DELFT3D, boven: absolute verandering; onder relatieve verandering t.o.v. het nulalternatief.

---

## 7.7 Het mondingsgebied en de Beneden Zeeschelde

### 7.7.1 De Beneden Zeeschelde

De effecten van de twee verdiepingsalternatieven (12,5m en 13,1m) op de morfologische veranderingen van de Beneden Zeeschelde worden beschouwd aan de hand van de resultaten van de DELFT3D berekeningen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur F. 1 t/m Figuur F. 6 van Bijlage F.

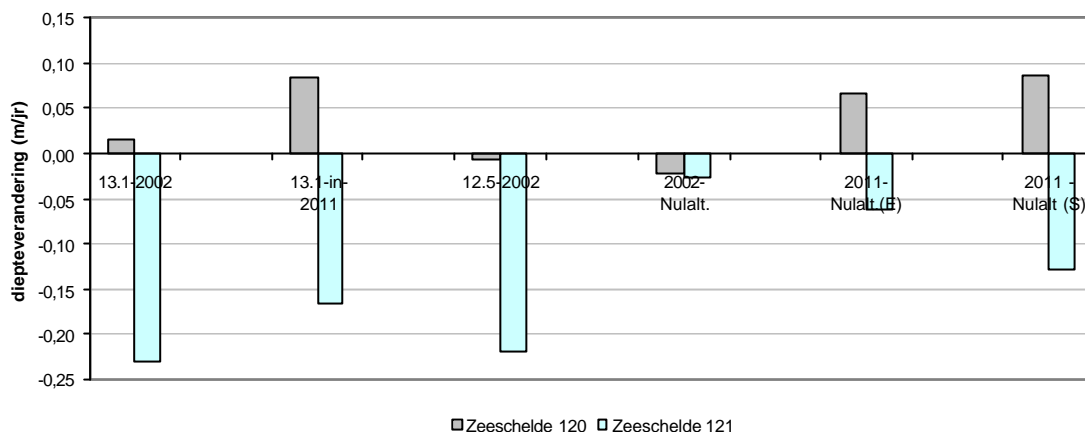
In Figuur F. 1 is de bodemniveauperandering in de periode 2002-2003 volgens het nulalternatief (x19) afgebeeld. Deze berekening wordt als referentie gebruikt bij het beschouwen van de *initiële* effecten van de verdiepingen. Figuur F. 2 en Figuur F. 3 laten de verschillen van de twee verdiepingsscenario's t.o.v. de referentieberekening zien. Opgemerkt wordt dat tijdens deze berekeningen geen vaargeulonderhoud wordt gesimuleerd. De effecten van bijvoorbeeld veranderingen in de stortstrategie kunnen hierbij dus niet worden beschouwd. Dit verklaart waarom in de berekeningen voor de verdiepingsalternatieven (x16 en x18) in het hele estuarium alleen relatieve bodemveranderingen rondom de vaargeul kunnen worden waargenomen (Figuur F. 2 en Figuur F. 3).

Concentreren wij ons op de Beneden Zeeschelde dan zien we dat, volgens de berekening voor het nulalternatief, er in de buitenbocht van de vaargeul erosie optreedt en sedimentatie in de binnen bocht van de vaargeul (Figuur F. 1). Dit beeld geldt ook voor de twee berekeningen voor de verdiepingsalternatieven (zie Figuur F. 2 en Figuur F. 3, let op dat de schalen anders zijn dan in Figuur F. 1). Opvallend is dat er voor het Zeeschelde gebied een duidelijk verschil is tussen de repons op het 12.5m-alternatief (Figuur F. 2) en de initiële repons op het 13.1m-alternatief (Figuur F. 3). Dit komt doordat de berekeningen een initiële response op de verdieping van de vaargeul weergeven. Blijkbaar gaan de twee verdiepingsscenario's gepaard met duidelijk verschillende verstoringen van de huidige 'evenwichts'-bodempligging. Voor beide alternatieven geldt verder dat het verschil in de verandering van het bodemniveau sterk fluctueert in de dwarsrichting.

De Figuren F1 t/m F3 tonen de resttransportpatronen uit de referentieberekening (voor het nulalternatief, x19) en veranderingen in deze patronen onder invloeden van de twee verdiepingsalternatieven. Beide verdiepingsalternatieven gaan gepaard met een verzwakking van de residuele vloed-eb circulatie in de Beneden Zeeschelde.

Figuur 7-15 toont tot slot de initiële diepteverandering van het gebied onder NAP-2m voor de vakken 120 en 121 (dit zijn vakken volgens de ESTMORF-schematisatie, zie Figuur 7-15b). Beide vakken worden in 2002 in het nulalternatief gekenmerkt door een kleine afname van de waterdiepte (sedimentatie). In 2011 is de initiële afname van de waterdiepte in gebied 120 veranderd in een initiële verdieping. In vak 120 is de afname van de waterdiepte juist toegenomen. Kijken we naar de initiële effecten van de verdiepingen dan treedt in vak 120 een initiële erosie op bij beide verdiepingsalternatieven, waarbij de erosie voor het alternatief 13.1 in 2011 is toegenomen. In vak 121 treedt juist een forse initiële sedimentatie op die in 2011 kleiner is dan in 2002. Over de oorzaak van deze veranderingen valt op dit moment niet veel te zeggen. Een natuurlijke verdieping van de Zeeschelde zou kunnen worden veroorzaakt door de toename van de getijslag in de loop der tijd (nulalternatief) en direct na de aanleg van de verdieping (zie ook Figuur 7-4). Tot slot moet worden opgemerkt dat deze resultaten betrekking hebben op de erosie en

sedimentatie van fijn zand. In dit gebied van het estuarium is de zandfractie fijner waardoor de veranderingen in werkelijkheid waarschijnlijk groter zullen zijn. Bovendien speelt slib hier ook een belangrijke rol: het troebelheidmaximum beweegt zich tussen Bath en Antwerpen. Dit laatste proces kan met de opzet van het huidige DELFT3D model (nog) niet worden gesimuleerd.



**Figuur 7.15a** Initiële diepteveranderingen (beneden NAP-2m) in de Beneden Zeeschelde volgens DELFT3D



**Figuur 7.15b** Ligging van de vakken 120 en 121 waarvoor de verandering in gemiddelde waterdiepte beneden NAP-2m is bepaald.

### 7.7.2 Het mondingsgebied

De effecten van de verdiepingsalternatieven op het mondingsgebied zijn bij de analyse van de zandhuishouding globaal aan de orde geweest. Hieruit is gebleken dat de

---

verdiepingsvarianten '13.1-in-stortnul', '13.1-in' en '12.5-in' gepaard gaan met een kleine relatieve erosie (ten opzichte van het nulalternatief, zie Figuur 7-2), terwijl de verdiepingsvarianten '13.1-uit' en '13.1-in-zwin0' gepaard gaan met een relatieve sedimentatie. In deze paragraaf wordt hier nader op ingegaan door de erosie en sedimentatiepatronen van de varianten '13.1-in', '12.5-in' en '13.1-in-zwin0' te beschouwen. Voor alle deze berekeningen geldt de voorlopig verbeterde stortstrategie.

In Figuur G. 1 t/m Figuur G. 3 van Bijlage G zijn de verschillen in sedimentatie-erosie in het mondinggebied na 30 jaar t.o.v. het nulalternatief afgebeeld. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- De twee verdiepingsscenario's in combinatie met de veranderde stortstrategie hebben praktisch geen effect op de morfologische ontwikkelingen in het mondinggebied volgens de ESTMORF resultaten. In Figuur G. 1 en Figuur G. 2 is het verschil t.o.v. het nulalternatief alleen zichtbaar in de buurt van de raai Vlissingen, waar de verdiepingsscenario's een kleine erosie (dan wel verminderde sedimentatie) veroorzaken. Zelfs daar is het verschil erg klein, minder dan 10 cm verschil in bodemniveauperandering in 30 jaar tijd. Opvallend is dat de 12,5 verdieping iets meer effect heeft dan de 13,1 verdieping.
- Het effect van het stoppen met de zandwinning op de morfologische ontwikkeling van het mondinggebied is groter, maar nog steeds relatief klein. Het verschil in de verandering van het bodemniveau in 30 jaar tijd is minder dan 15 cm, zoals blijkt uit Figuur G. 3. Omdat de (13,1) verdieping van de vaargeul en de verandering van de stortstrategie praktisch geen invloed hebben op de morfologische verandering in het mondinggebied (Figuur G. 2), moeten de afgebeelde veranderingen in Figuur G. 3 worden veroorzaakt door het stoppen van de zandwinning. Deze invloed strekt zich uit over het hele mondinggebied waarbij bijna overal een relatieve sedimentatie optreedt.

Het vaargeulonderhoud in het mondingsgebied zelf verandert niet in de berekeningen voor de verschillende verdiepingsalternatieven. Dit betekent dat de effecten van de verdiepingsalternatieven die in het mondingsgebied worden waargenomen het gevolg zijn van veranderingen in de waterbeweging die worden veroorzaakt door de morfologische veranderingen in de Westerschelde. Dit verklaart dan ook meteen waarom het stoppen van zandwinning het grootste effect heeft en zich manifesteert als een sedimentatie: Zoals in paragraaf 7.3 is beschreven heeft het stoppen met zandwinning op den duur tot gevolg dat het estuarium minder verruimt en dat daardoor de getijslag gaat afnemen ten opzichte van het nulalternatief. Dit leidt tot een relatieve afname van het getijvolume en sedimentatie in het mondinggebied.

## **7.8 Discussie en conclusies**

### **7.8.1 Inleiding**

In dit hoofdstuk zijn de morfologische effecten van twee verdiepingsalternatieven onderzocht:

1. Een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 13.1 meter, en
  2. Een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 12.5 meter,
- Voor alternatief 1 zijn meerdere varianten onderzocht om inzicht te krijgen in de invloed van de stortstrategie en de zandwinning (zie Tabel 7-1 en Tabel 7-2).

---

De historische referentie en de resultaten voor het nulalternatief hebben laten zien dat het meergeulensysteem wordt gekenmerkt door grote 'autonome' ontwikkelingen. De effecten van de verschillende verdiepingsalternatieven zijn klein in vergelijking tot deze autonome ontwikkeling. Daarom zijn voor de verschillende verdiepingsalternatieven de relatieve effecten bepaald. De effecten van de verschillende alternatieven worden in volgende paragraaf samengevat, waarbij per alternatief de onderzoeksvragen 1 t/m 4 (zie Hoofdstuk 1) worden beantwoord. Op basis van de resultaten voor de twee verdiepingsalternatieven wordt aangegeven wat naar verwachting de effecten van een verdieping naar 12.8 m zullen zijn.

---

### 7.8.2 Belangrijkste effecten van verschillende verdiepingsalternatieven

Een verdieping naar 13.1 m, waarbij de aanlegspecie en de grotere baggervolumina voor het onderhoud van de vaargeul worden gestort volgens dezelfde stortstrategie als het nulalternatief, gaat overwegend gepaard met een versterking van de ontwikkelingstendenzen volgens het nulalternatief. Dit betekent:

1. Een versterking van de ontwikkelingen in de zandhuishouding (vraag 1). Dit betekent dat de erosie van het meergeulensysteem als geheel zich voortzet, waarbij de erosie van het oostelijk deel en de sedimentatie in het westelijk toenemen. De landwaarts gerichte sedimenttransporten naar het oostelijk deel en de zeewaarts gerichte sedimenttransporten in het westelijk (de sedimentexport) nemen toe.
2. Versterkte veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem (vraag 2), waarbij het waargenomen geprononceerde kantelingproces van het meergeulensysteem zich in zeewaartse richting uitbreidt. Deze uitbreiding manifesteert zich in macrocel 3 (nabij Terneuzen) in westelijk deel, waar het geulsysteem meer richting vloedgeul kantelt als gevolg van de grotere netto stortingen.
3. Een vergelijkbare afname van het areaal intergetijdengebied<sup>14</sup> in de Westerschelde als geheel (vraag 3), waarbij de afname van het areaal in het oostelijk deel toeneemt en er in het middendeel en westelijk deel een relatieve toename van het areaal optreedt.
4. Een verdere afname van het areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde als geheel (vraag 4). Deze afname manifesteert zich in westelijk deel. In het midden en oostelijk deel treedt een relatieve toename van het areaal ondiepwatergebied op.

Deze effecten impliceren dat de potentiële knelpunten ten aanzien van de instandhouding van het karakter van het meergeulensysteem groter worden bij een verdere verdieping. Deze knelpunten kunnen voor een deel worden gemitigeerd door een aanpassing van de stortstrategie.

Een verdieping naar 13.1 m waarbij de stortstrategie wordt aangepast (verbeterde stortstrategie) leidt tot volgende relatieve effecten ('13.1-in-verbeterd' en '13.1-in-nulalternatief'):

1. Veranderingen in de zandhuishouding waarbij de erosie van het oostelijk deel afneemt en de sedimentatie in het middendeel en het westelijk deel veranderen in een erosie. De sedimentexport naar de monding neemt af, terwijl de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel toenemen (zie Figuur 7-2).
2. De stabiliteit van het geulsysteem neemt toe, waarbij de zeewaartse uitbreiding van de kanteling van het meergeulensysteem niet optreedt (zie Figuur 7-8).
3. Een kleine toename van het areaal intergetijdengebied in de Westerschelde als geheel (vraag 3), waarbij het areaal in het oostelijk deel relatief toeneemt en in het middendeel en westelijk deel afneemt (zowel absoluut als relatief, zie Figuur 7-10).
4. Een verdere afname van het areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde als geheel (vraag 4). Deze afname manifesteert zich in het westelijk deel en middendeel (relatief en absoluut, zie Figuur 7-13). In het oostelijk deel treedt een relatieve toename van het areaal ondiepwatergebied op (kleinere afname).

Het onttrekken van de specie die vrijkomt bij de aanleg van een verdieping, gaat gepaard met de volgende effecten (vergelijking van '13.1-in-verbeterd', '13.1-uit-verbeterd'):

1. Veranderingen in de zandhuishouding waarbij het meergeulensysteem als geheel meer erodeert. De erosie van het oostelijke en westelijk deel nemen toe, de sedimentatie in

---

<sup>14</sup> Waarbij het intergetijdengebied is gedefinieerd volgens de vaste referentieniveau's: de gebieden tussen NAP-2m en NAP+3.5m.



---

het westelijk deel neemt af (relatieve erosie). De sedimentexport naar de monding neemt toe, terwijl de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel enigszins afnemen (zie Figuur 7-2).

2. De stabiliteit van het geulsysteem verandert weinig (niet significant gegeven de onzekerheden in de voorspellingen, zie Figuur 7-8).
3. Een afname van het areaal intergetijdengebied in de Westerschelde als geheel (vraag 3), die zich manifesteert in het oostelijk deel, het middendeel en het westelijk deel (zowel absoluut als relatief, zie Figuur 7-10).
4. Een verdere afname van het areaal ondiepwatergebied van het meergeulensysteem als geheel (vraag 4). Deze afname manifesteert zich in het oostelijk deel, het middendeel en het westelijk deel (relatief en absoluut, zie Figuur 7-13).

Deze effecten betekenen dat een deel van de mitigerende effecten van de verbeterde stortstrategie door het onttrekken van de aanlegspecie weer teniet worden gedaan: het areaal intergetijdengebied en het areaal ondiepwatergebied nemen af en de erosie van het meergeulensysteem als geheel neemt toe.

Het afbouwen van de zandwinning in de toekomst is een optie voor het beleid. De effecten van het afbouwen zonder een wezenlijke aanpassing van de stortstrategie kunnen als volgt worden gekarakteriseerd:

1. Grote veranderingen in de zandhuishouding waarbij de het meergeulensysteem als geheel minder erodeert (relatieve sedimentatie). Een enigszins verminderde erosie van het oostelijk deel, en een sedimentatie in het middendeel (absoluut en relatief) en in het westelijk deel. Het sedimenttransport naar het oostelijk deel en de sedimentexport naar de monding nemen toe (zie Figuur 7-2).
2. Grote veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem die vergelijkbaar zijn met het nulalternatief en het verdiepingsalternatief waarbij gestort wordt volgens de stortstrategie van het nulalternatief (zie Figuur 7-8). Deze veranderingen worden veroorzaakt doordat het afbouwen van de zandwinning gepaard gaat met grotere netto stortingen in de vloedgeul van macrocel 3, die volgens het model een kritische grootte overschrijden, waardoor een sterke kanteling van het geulsysteem optreedt.
3. Een kleine relatieve afname van het areaal intergetijdengebied in de Westerschelde als geheel (vraag 3), die zich manifesteert in het middendeel en het westelijk deel (Figuur 7-10).
4. Een relatieve toename van het areaal ondiepwatergebied doordat de geulen minder eroderen. Deze toename manifesteert zich in het oostelijk deel (relatieve toename), in het middendeel en het westelijke deel (relatief en absoluut, zie Figuur 7-13).

De voorspelde effecten geven aan dat een verdere verbetering van de stortstrategie nodig is om de stabiliteit van het geulsysteem te kunnen garanderen bij het afbouwen van de zandwinning.

De effecten van het 12,5 m verdiepingsalternatief met verbeterde stortstrategie kunnen worden bepaald door dit alternatief te vergelijken met het 13.1 m verdiepingsalternatief ('12.5-in-verbeterd' met '13.1m-in-verbeterd'). De effecten kunnen als volgt worden gekarakteriseerd:

1. Veranderingen in de zandhuishouding waarbij de erosie van het oostelijke afneemt (relatieve sedimentatie), de erosie van het middendeel toeneemt (absoluut en relatief) en de sedimentatie in het westelijk deel afneemt (relatieve erosie). De erosie van het meergeulensysteem als geheel verandert niet noemenswaardig. De sedimentexport naar de monding en de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel nemen af (zie Figuur 7-2).

- 
2. De stabiliteit van het geulsysteem verandert weinig (niet significant gegeven de onzekerheden in de voorspellingen, zie Figuur 7-8).
  3. Een kleine relatieve toename van het areaal intergetijdengebied in de Westerschelde als geheel (vraag 3), die zich manifesteert in het oostelijk deel. (zie Figuur 7-10).
  4. Een kleine toename van het areaal ondiepwatergebied van het meergeulenstelsel als geheel (vraag 4). Deze toename manifesteert zich in het oostelijk deel (zie Figuur 7-13).
- Op basis van deze voorspelde effecten is de verwachting dat het 12.8 m verdiepingsalternatief kwalitatief vergelijkbare effecten zal veroorzaken als het 12.5 m verdiepingsalternatief. De grootte van de effecten zal wat kleiner zijn (tussen de effecten van 12.5 m en 13.1 m in).

---

### 7.8.3 Onzekerheden

De grootste onzekerheden in de resultaten komen voort uit het feit dat de evaluatie van de stabiliteit van het geulsysteem primair is gebaseerd op de resultaten uit het SOBEK model dat niet is gevalideerd en waarvan de voorspelkracht dus niet bekend is. Hierdoor is het mogelijk dat de absolute morfologische ontwikkeling van de geulen in het nulalternatief niet juist is. De verwachting is echter dat de voorspelde trends in de kritische gebieden 3 en 4 in het nulalternatief en de *verandering* in deze trends in de verdiepingsalternatieven met verbeterde stortstrategie wel juist zijn. Een extra onzekerheid hangt samen met de 'natuurlijke' ontwikkeling van het systeem die niet goed gekend is.

De onzekerheden in de effectvoorspelling zijn op een kwalitatieve wijze in kaart gebracht door waar mogelijk en zinvol het teken van de voorspelde effecten volgens de verschillende modellen met elkaar te vergelijken. Hieruit blijkt dat de onzekerheden het kleinst zijn in de zandhuishouding. Daarna volgen de onzekerheden in de voorspelde veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem, gevolgd door de veranderingen in het areaal intergetijdengebied. De onzekerheden zijn het grootst in de voorspelde verandering van het areaal ondiepwatergebied. De effecten van de verdieping worden geëvalueerd ten opzichte van het nulalternatief, een relatieve beschouwing. De onzekerheden in deze relatieve effecten zijn kleiner dan de onzekerheden in de absolute veranderingen.

### 7.8.4 Conclusies

De huidige studie van de verdiepingsscenario's met een verbeterde stortstrategie tonen geen aantasting aan van de stabiliteit van het geulensysteem. Dat betekent dat de vaargeul waarschijnlijk kan worden verdiept onder voorwaarde dat er een verbeterde stortstrategie wordt toegepast. Bij een verdieping met verbeterde stortstrategie neemt de erosie van de Westerschelde als geheel af (vraag 1). De verandering van het areaal intergetijdengebied hangt van de mate van verdiepen (vraag 3). Het areaal ondiepwatergebied neemt af in alle verdiepingsvarianten (vraag 4).

De verschillen tussen de effecten van de diverse verdiepingsalternatieven en varianten worden in belangrijke mate bepaald door de strategie voor het storten van de onderhoudsspecie (nulalternatief of verbeterd) en het al dan niet stoppen van de zandwinning. Het verschil in de effecten is het duidelijkst zichtbaar in de zandbalans en de stabiliteit van het geulsysteem. De voorspelde effecten op het areaal intergetijdengebieden en het ondiepwatergebied zijn waarschijnlijk klein en relatief onzeker.

Alle effecten zijn klein ten opzichte van de te verwachten toekomstige ontwikkelingen volgens het referentie-/nulalternatief.

De knelpunten ten aanzien van de stabiliteit van het geulsysteem (vraag 2) in het nulalternatief kunnen worden gemitigeerd door een aanpassing van de stortstrategie.

---

## 8 Morfologische effecten van een verdieping in combinatie met uitpolderingen

### 8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de morfologische effecten van een pakket van maatregelen beschouwd. Dit pakket bestaat uit twee maatregelen:

1. Een verdere verdieping van de vaargeul naar een diepgang van 13,1m. De specie die vrijkomt bij de aanleg van de verdieping, de aanlegspecie, en de specie die vrijkomt bij het onderhouden van de vaargeul, de onderhoudsspecie, worden beiden in het estuarium teruggestort volgens de voorlopig verbeterde stortstrategie.
  2. Een combinatie van vier kleinschalige uitpolderingen langs de Westerschelde, de variant overige uitpolderingen zoals beschouwd in Hoofdstuk 6 (zie Figuur 6-1).
- Deze maatregelen moeten bijdragen aan de Streefbeelden voor Toegankelijkheid en Natuurlijkheid.

Om te kunnen beoordelen of de randvoorwaarden voor het instandhouden van het meergeulensysteem ook bij dit pakket van maatregelen gewaarborgd zijn, worden in de navolgende paragrafen de vier onderzoeksvragen, zoals geformuleerd in Hoofdstuk 1, beantwoord. Hiervoor is een simulatie van het alternatief met het ESTMORF model uitgevoerd. Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden worden de resultaten van deze ESTMORF simulatie vergeleken met de voorspelde effecten van drie eerder beschouwde alternatieven (relatieve effectbepaling), te weten:

- Het nulalternatief waarin het huidige beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning wordt voortgezet.
- Het Natuuralternatief overige uitpolderingen (Hoofdstuk 6), waarin het huidige beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning, volgens het nulalternatief, wordt voortgezet.
- Het verdiepiingsalternatief 13,1m met het storten van de aanlegspecie en de onderhoudsspecie in het estuarium volgens de voorlopig verbeterde stortstrategie.

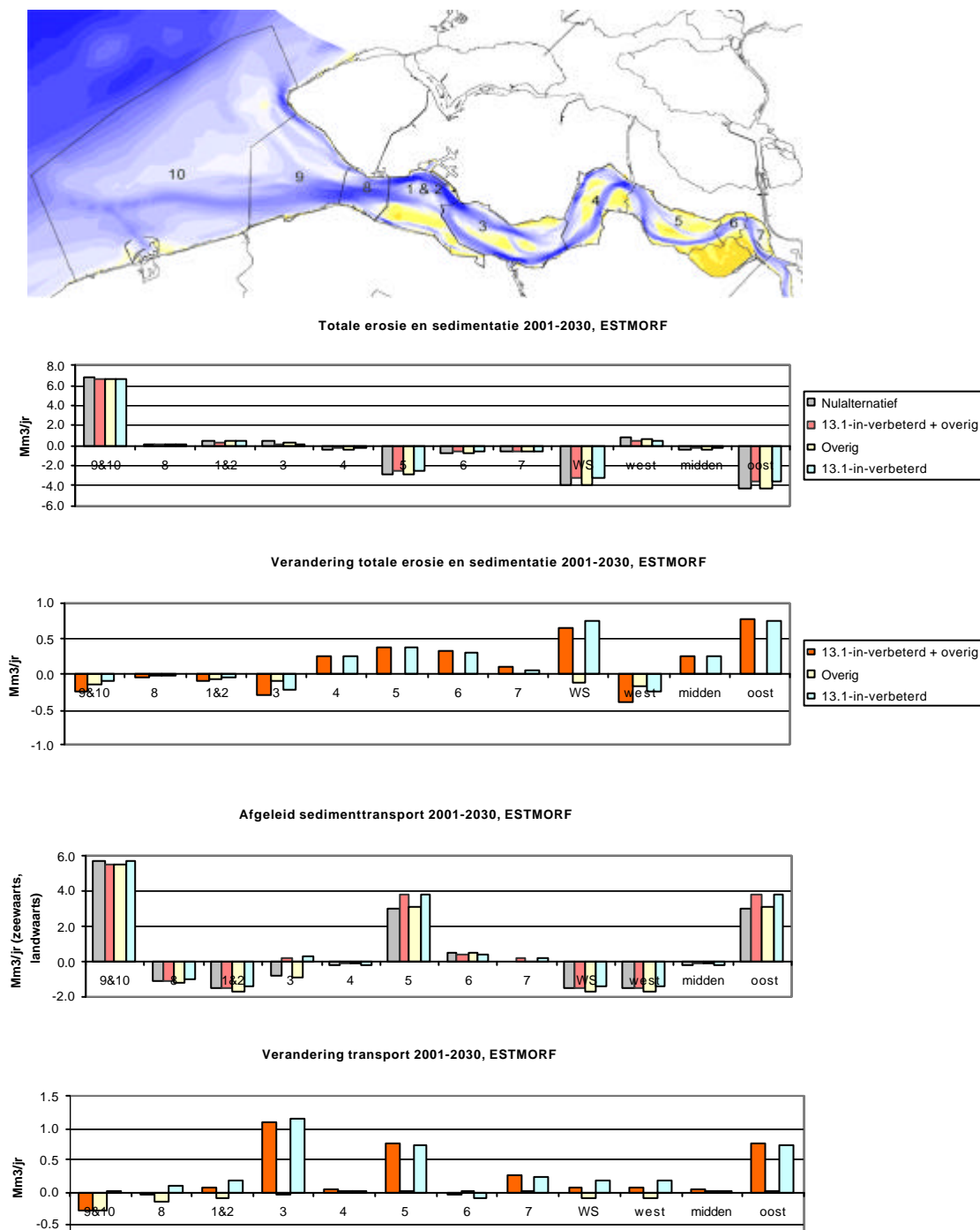
Deze vergelijking geeft inzicht in de mate van interacties tussen beide maatregelen: is het totale effect van het pakket van maatregelen min of meer een optelsom van de effecten van beide afzonderlijke maatregelen of versterken dan wel verzwakken de maatregelen elkaar.

Om de ESTMORF berekening te kunnen uitvoeren zijn de uit te polderen gebieden op dezelfde manier, zoals beschreven in paragraaf 6.2, ingebracht in het ESTMORF model met verdiepte vaargeul. Voorts is aangenomen dat de uitpolderingen een verwaarloosbare invloed hebben op de omvang van het onderhoudsbaggerwerk. Deze aanname is op basis van de effecten van het Natuuralternatief overige uitpolderingen, zoals beschreven in Hoofdstuk 6, te rechtvaardigen. De voorspelde invloed van de uitpolderingen op de waterbeweging en de voorspelde sedimentatie en erosie in de geulen is klein (niet meetbaar, zie Figuur 6-3 en Figuur 6-4).

### 8.2 Effecten op de zandhuishouding

Figuur 8-1 toont de zandbalans over de periode 2001-2030 voor het pakket en voor de verschillende eerder beschouwde alternatieven (waaronder het nulalternatief). Hieruit blijkt dat de effecten van het pakket van maatregelen veel overeenkomsten vertonen met het alternatief waarin alleen wordt verdiept en gestort volgens de verbeterde stortstrategie. Dit

betekent dat de veranderingen in de zandhuishouding als gevolg van het maatregelenpakket vooral het gevolg zijn van het verdiepen en het storten volgens de voorlopig verbeterde stortstrategie en slechts weinig worden beïnvloed door de uitpolderingen. Dit was ook te verwachten omdat al gebleken is dat het alternatief overige uitpolderingen (zonder verdiepingen met oude stortstrategie) sterke overeenkomsten met het nulalternatief vertoont voor wat betreft de zandhuishouding.



**Figuur 8-1 De zandbalans over de periode 2001-2030 en de veranderingen in de zandbalans ten opzichte van het nulalternatief. Het eerste en derde staafdiagram**

---

***tonen de totale erosie / sedimentatie in diverse deelgebieden en de afgeleide sedimenttransporten op de zeewaartse randen van deze deelgebieden volgens het nulalternatief, het maatregelenpakket (verdieping + uitpolderingen), alleen een verdieping en alleen de overige uitpolderingen. Het tweede en vierde staafdiagram tonen de veranderingen ten opzichte van het nulalternatief, waarbij een positieve verandering duidt op relatieve sedimentatie of relatieve import. Een negatieve verandering betekent relatieve erosie of export.***

Het pakket van maatregelen veroorzaakt de volgende veranderingen in de zandhuishouding ten opzichte van het nulalternatief:

- Een afname van de erosie van de Westerschelde als geheel en een kleine afname van de sedimentexport ter hoogte van Vlissingen.
- Een afname van de totale erosie en sedimentatie in de diverse deelgebieden van de Westerschelde waarbij de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel toenemen en de zeewaarts gerichte transporten in het westelijk deel afnemen.
- Een relatieve erosie van het mondingsgebied.

Deze effecten op de zandhuishouding worden bepaald door de combinatie van de fysische mechanismen, zoals beschreven in paragraaf 7.3.1 en 6.3. Hierbij is de invloed van de veranderde stortstrategie op de veranderingen in getijslag en getijvolume groter dan de invloed van de uitpolderingen.

De verschillen in de relatieve effecten tussen het pakket maatregelen en het verdiepingsalternatief 13,1m worden veroorzaakt door de uitpolderingen. Deze verschillen (niet als aparte reeks opgenomen in Figuur 8-1) zijn vergelijkbaar met de relatieve effecten van het natuuralternatief overige uitpolderingen (zie tweede en vierde staafdiagram in Figuur 8-1). De belangrijkste effecten van de uitpolderingen bestaan uit een relatieve erosie van de Westerschelde die zich manifesteert in het westelijk deel van de Westerschelde en een toename van het zeewaarts gerichte sedimenttransport in het westelijk deel van de Westerschelde. Deze (niet-lineaire) effecten zijn klein in vergelijking tot het effecten van het pakket maatregelen en het verdiepingsalternatief. Dit betekent dat het totale effect van het pakket van maatregelen min of meer een optelsom is van de afzonderlijke effecten.

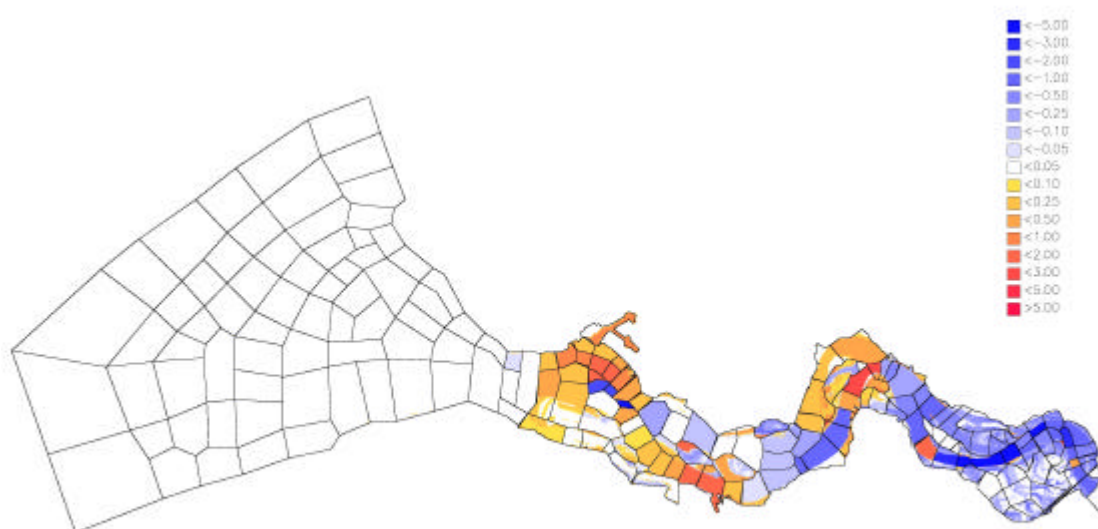
### **8.3 Effecten op de stabiliteit van de geulen**

Figuur 8-2 toont de berekende erosie en sedimentatiepatronen voor de periode 2001-2030 als indicatie voor de veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem in de macrocellen volgens het ESTMORF model voor het pakket van maatregelen. Daarnaast wordt in Figuur 8-3 het relatieve effect van de uitpolderingen ten opzichte van het nulalternatief en het verdiepingsalternatief 13.1 weergegeven.

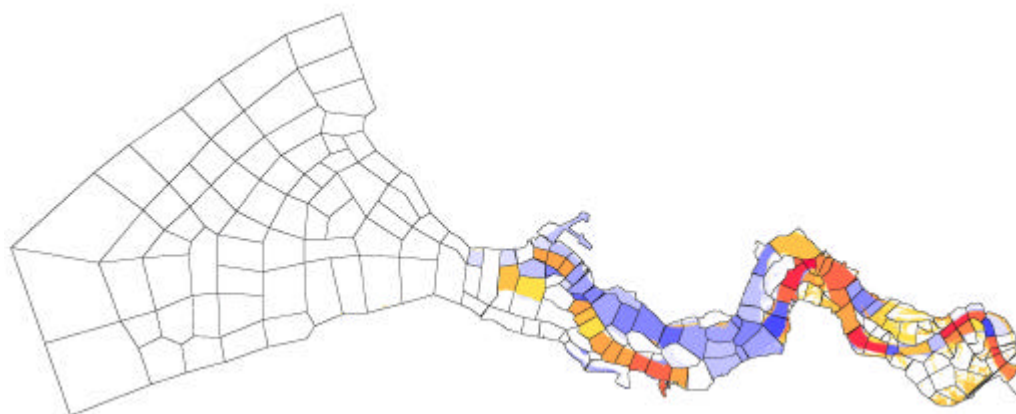
De relatieve effecten van de uitpolderingen zoals weergegeven in Figuur 8-3 zijn klein in vergelijking tot de voorspelde totale erosie en sedimentatie zoals samengevat in Figuur 8-2. Het feit dat de figuren 8.3a en 8.3b niet identiek zijn geeft aan dat het combineren van maatregelen gepaard gaat met kleine niet-lineaire interacties. De effecten van het pakket van maatregelen op de stabiliteit van de geulen worden vooral bepaald door het verdiepen met storten volgens verbeterde stortstrategie. Dit betekent dat het totale effect van het pakket van maatregelen min of meer een optelsom is van de afzonderlijke effecten, en dat de evaluatie van de stabiliteit van de geulen kan worden gebaseerd op de voorspelde effecten van het verdiepingsalternatief 13,1m zonder uitpolderingen, zoals die zijn

beschouwd in Hoofdstuk 7<sup>15</sup>. De veranderingen in de stabiliteit van de geulen in de macrocellen als gevolg van het pakket van maatregelen laten zich dan als volgt karakteriseren (Figuur 7-8 en Figuur 8-2):

- Een nagenoeg algemene erosie van het geulsysteem in het oostelijk deel waarbij de diepte van de ebgeulen meer toeneemt dan de gemiddelde diepte van de vloedgeulen. Het geulsysteem kantelt richting vaargeul. De kanteling is vergelijkbaar met het nulalternatief en het verdiepingsalternatief 13.1m.



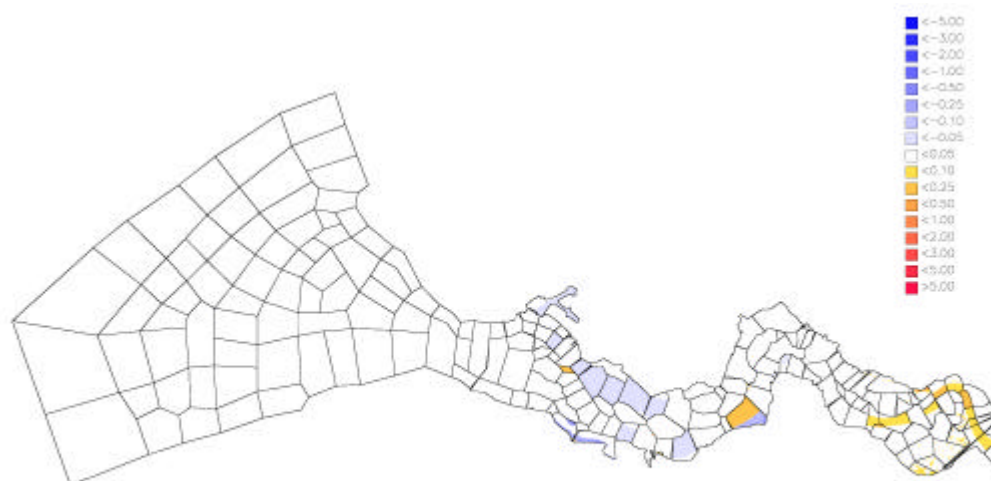
a) Erosie en sedimentatie gedurende de periode 2001-2030 in het alternatief maatregelenpakket.



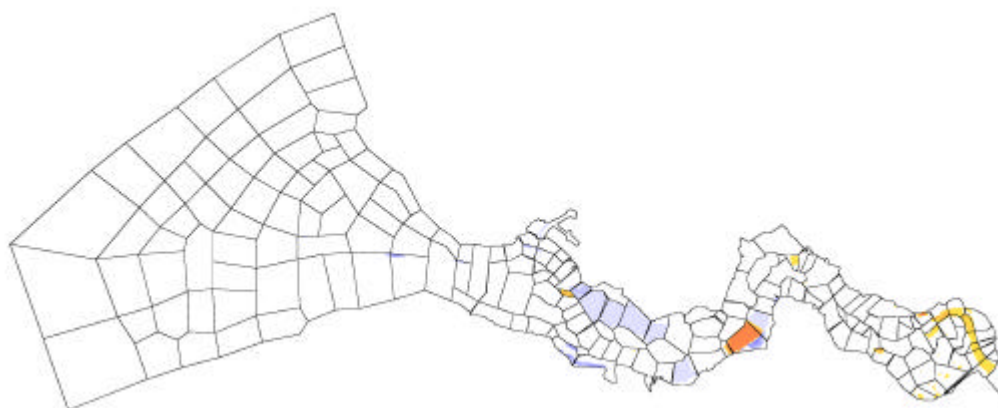
b) Relatieve erosie en sedimentatie ten opzichte van het nulalternatief.

<sup>15</sup> Het ESTMORF model met de huidige instelling heeft een beperking t.a.v. het voorspellen van veranderingen in de stabiliteit onder invloed van baggeren en storten. Doordat gebruik kan worden gemaakt van de SOBEK resultaten voor het verdiepingsalternatief worden de onzekerheden in de voorspelling als gevolg van de beperking van ESTMORF deels ondervangen.

**Figuur 8-2 Erosie en sedimentatie (in meters) na 30 jaar (2001-2030, figuur b) in het alternatief verdiepen met uitpolderen. In de Westerschelde is de absolute erosie en sedimentatie over de periode 2001-2030 weergegeven. In het mondingsgebied zijn de veranderingen in de erosie en sedimentatie ten opzichte van het nulalternatief weergegeven (zie Hoofdstuk 3).**



**a) Relatieve erosie en sedimentatie van het pakket van maatregelen ten opzichte van het verdiepingsalternatief '13.1-in-verbeterd' (effect van uitpolderen).**



**b) Relatieve erosie en sedimentatie van het Natuuralternatief Overige uitpolderingen ten opzichte van het nulalternatief (conform Figuur 6-4, maar met aangepaste legenda).**

**Figuur 8-3 Relatieve erosie en sedimentatie na 30 jaar als gevolg van uitpolderen (in meters). Dit figuur laat zien dat het combineren van uitpolderingen met een verdieping en een andere stortstrategiegepaard gaat met kleine niet-lineaire interacties. Figuur 8.3a toont in vergelijking tot Figuur 8.3b: een iets grotere sedimentatie in de vaargeul in het oostelijk deel. In het middendeel neemt de sedimentatie in de vaargeul juist iets af. In het westelijk deel zijn de verschillen tussen Figuur 8.3a en 8.3b verwaarloosbaar klein.**



---

---

- Een voortgaande kanteling van het geulsysteem richting vaargeul (de vloedgeul in dit gebied) in macrocel 4, in het middendeel van de Westerschelde ter hoogte van Hansweert. De kanteling is minder sterk dan in het nulalternatief, maar blijft wel een aandachtspunt: In alle alternatieven zoals die in deze studie zijn beschouwd treedt in dit geulsysteem volgens het SOBEK model (zie Figuur 7-8) een verdergaande kanteling richting vaargeul op, waarbij op een termijn van dertig jaar de ebgeul (nevenvaarwater) een nieuwe evenwichtssituatie bereikt. In deze nieuwe situatie is de ebgeul ongeveer 2 meter ondieper en de vloedgeul gemiddeld ongeveer 1 meter dieper dan in de huidige situatie.
- Een kanteling richting vloedgeul (nevengeul) in het westelijk deel van de Westerschelde.
- Geen effecten op de stabiliteit van het geulsysteem in het mondingsgebied.

Uit de verschillende beschouwde verdiepingsalternatieven (Hoofdstuk 7) is gebleken dat deze veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem ten opzichte van het nulalternatief, in belangrijke mate worden bepaald door de gehanteerde strategie voor het storten van de onderhoudsspecie en niet zo zeer het verdiepen zelf.

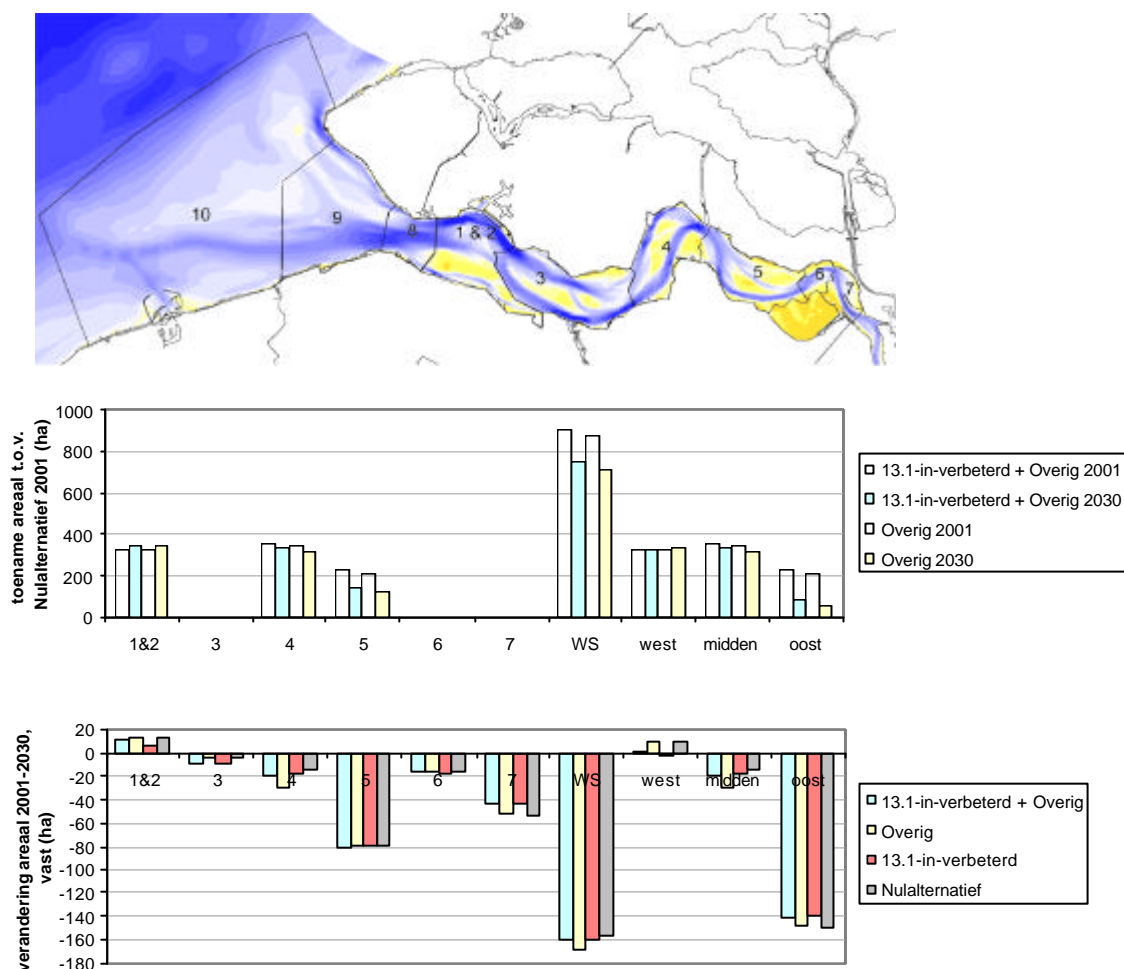
Kijken we tot slot naar de locaties waar in macrocel 3, in het westelijk deel, kortsluitgeulen voorkomen (zie ook het dieptekaartje in Figuur 8-1 en Figuur 2-2) dan valt het volgende op: In het pakket en de drie eerder beschouwde alternatieven treedt sedimentatie op in de kortsluitgeul Zuid-Everingen die de platen in macrocel 3 doorsnijdt en 'omploegt' op een tijdschaal van enkele decennia tot een eeuw. Deze sedimentatie is in het alternatief waarin maatregelen worden gecombineerd en in de verdiepingsalternatieven met verbeterde stortstrategie (Bijlage E) echter kleiner dan in het nulalternatief en het Natuuralternatief overige uitpolderingen. Een ander belangrijk verschil tussen het pakket en het nulalternatief (en het verdiepingsalternatief en het nulalternatief) manifesteert zich in het drempelgebied van de grote vloedgeul van macrocel 3, waar diverse dynamische kortsluitgeulen voorkomen. In tegenstelling tot het nulalternatief erodeert dit drempelgebied in het pakket en het verdiepingsalternatief. Deze erosie is waarschijnlijk een natuurlijke reactie op de sedimentatie in de Zuid-Everingen en kan in werkelijkheid (niet in het model) leiden tot het ontstaan van nieuwe kortsluitgeulen zoals de Zuid-Everingen.

#### **8.4 Effecten op de ontwikkeling van de intergetijdengebieden**

Figuur 8-4 toont de veranderingen van het intergetijdengebied. Het bovenste staafdiagram laat de initiële winst van het areaal intergetijdengebied zien en de verandering van die initiële winst in de loop der tijd. Het onderste staafdiagram laat alleen de veranderingen over de periode 2001-2030 voor het pakket en de drie eerder beschouwde alternatieven zien.

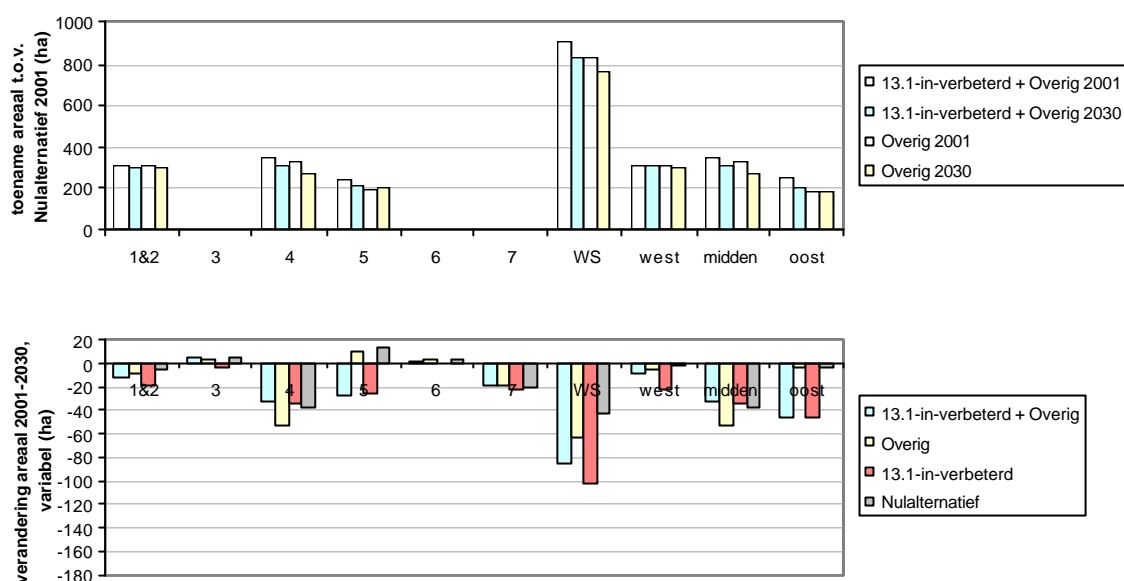
In Hoofdstuk 6 was voor het Natuuralternatief overige uitpolderingen geconcludeerd dat de initiële winst als gevolg van de uitpolderingen grotendeels behouden blijft gedurende een periode van dertig jaar. Deze conclusie is ook van toepassing op het alternatief met het pakket van maatregelen (zie bovenste staafdiagram in Figuur 8-4). Alleen in het oostelijk deel is er sprake van een duidelijke afname van het areaal intergetijdengebied (ca 140 ha in 30 jaar tijd). De afname van het areaal intergetijdengebied in het oostelijk deel (erosie) wordt in het model veroorzaakt door het verruimen en het tekort aan zand in de geulen als gevolg van netto baggeren. Het pakket maatregelen gaat niet gepaard met wezenlijk andere

veranderingen van het areaal intergetijdengebied gedurende de periode 2001-2030 dan de andere alternatieven in Figuur 8-4 (onderste staafdiagram).



**Figuur 8-4 Ontwikkeling van het areaal intergetijdengebied (plaat + slik) waarbij de intergetijdengebieden zijn gedefinieerd als de gebieden tussen NAP-2m en NAP+3.5m. Oost is exclusief Saeftinghe.**

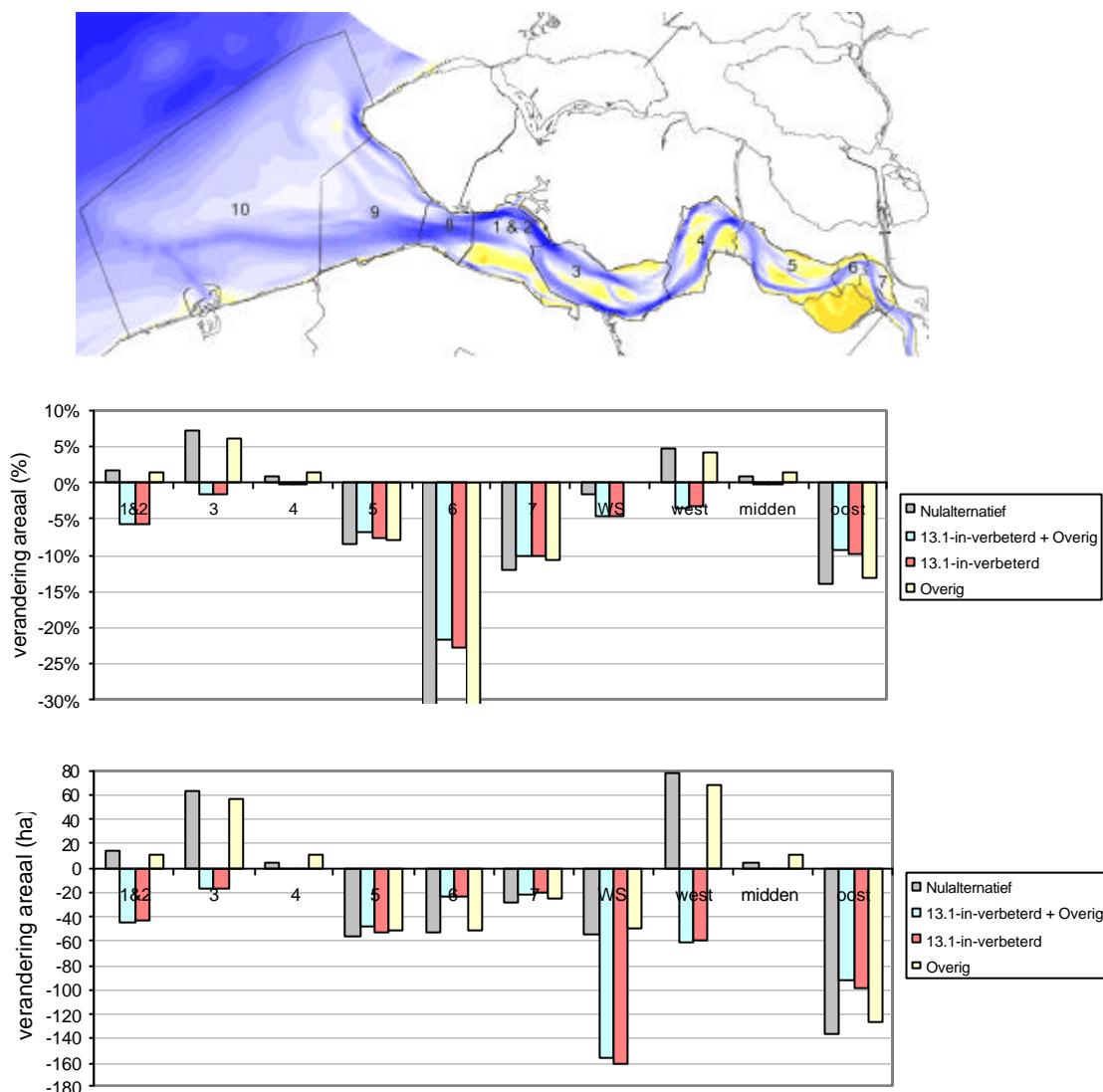
Figuur 8-5 toont tot slot de veranderingen van het areaal intergetijdengebied waarbij dit gebied is gedefinieerd als het gebied tussen hoogwater en laagwater (variabele referentie). Dit figuur bevestigt de invloed van de gehanteerde definitie (ook voor de veldwaarnemingen). De tekens van de veranderingen en/of de grootte van de areaalveranderingen wijzigen als gevolg van een andere definitie. Vooral de voorspelde afname in het oostelijk deel is bij een variabel referentieniveau aanzienlijk kleiner. De alternatieven met verbeterde stortstrategie leiden juist tot een relatief grotere afname van het areaal intergetijdengebied dan de alternatieven met de stortstrategie volgens het nulalternatief. Deze grotere afname wordt veroorzaakt doordat de verbeterde stortstrategie gepaard gaat met een minder grote erosie in het oostelijk deel en een relatieve afname van de getijslag.



**Figuur 8-5 Verandering van de intergetijdgebieden waarbij de intergetijdgebieden zijn gedefinieerd als de gebieden tussen hoogwater en laagwater (bij gemiddeld springtij). Oost is exclusief Saeftinghe.**

## 8.5 Effecten op de ontwikkeling van het ondiepwatergebied

De indicatieve veranderingen in het areaal ondiepwatergebied zijn samengevat in Figuur 8-6. Ook de voor het pakket voorspelde veranderingen in het areaal ondiepwatergebied vertonen veel overeenkomsten met het verdiepingsalternatief 13,1m. De grootste veranderingen manifesteren zich in de twee macrocellen 1 en 3 in het westelijk deel en macrocel 6 in het oostelijk deel. De relatieve erosie van de geulen in het westelijk deel (ten opzichte van het nulalternatief) gaat gepaard met een afname van het areaal ondiepwatergebied. In macrocel 6 treedt juist een tegenovergestelde ontwikkeling op. De afname in het westelijk deel komt tot uitdrukking in de verandering van het totale areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde als geheel. De veranderingen zijn echter klein ten opzichte van het totale areaal ondiepwatergebied (enkele procenten tot maximaal 20% in macrocel 6).



**Figuur 8-6** Indicatieve veranderingen van het ondiepwatergebied gedurende de periode 2001-2030. De procentuele veranderingen in gebied 6 voor het nulalternatief en het Natuuralternatief Overige uitpolderingen bedragen 69% en 65% (niet weergegeven op de as i.v.m. leesbaarheid van de figuur).

## 8.6 Discussie en conclusies

In de voorgaande paragrafen is nagegaan wat de morfologische effecten zijn van het combineren van het Natuuralternatief Overige uitpolderingen en het Toegankelijkheidsalternatief verdiepen naar een diepgang van 13,1m met de voorlopig verbeterde stortstrategie. Hierbij is vergelijkenderwijs gekeken naar: de zandhuishouding, de stabiliteit van de geulen in de Westerschelde en monding, en de arealen intergetijdengebied en ondiepwatergebied om de onderzoeksvragen 1 t/m 4 te kunnen beantwoorden. De antwoorden op deze vragen kunnen als volgt worden samengevat:

1. Het pakket van maatregelen gaat gepaard met veranderingen in de zandhuishouding die vergelijkbaar zijn met de veranderingen als gevolg van alleen het verdiepingsalternatief 13,1 m met verbeterde stortstrategie.

- 
- Dit betekent in vergelijking tot het nulalternatief een meer evenwichtiger zandhuishouding waarbij de grootschalige erosie en sedimentatietendensen verzwakken en de zeewaarts gerichte transporten (export) in het westelijk deel van de Westerschelde afnemen en de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel juist toenemen. Het relatieve effect van de uitpoldering bestaat uit een relatieve erosie in het westelijk deel en een relatieve sedimentatie in het oostelijk deel die klein is in vergelijking tot het effect van het verdiepen en vooral van de verbeterde stortstrategie.
2. De veranderingen in de stabiliteit van de geulen zijn eveneens vergelijkbaar met het verdiepingsalternatief. Dit betekent dat in vergelijking tot het nulalternatief de stabiliteit van de geulen toeneemt en het geulsysteem als geheel *minder* kantelt richting vaargeul. Deze verandering in de stabiliteit is vooral het gevolg van een aanpassing in de strategie voor het storten van de onderhoudsspecie. Aandachtspunt blijft wel het geulsysteem in macrocel 4 in het middendeel van de Westerschelde (nabij Hansweert, zie paragraaf 8.3).
  3. De uitpolderingen resulteren ook in combinatie met een verruiming in een forse initiële winst van het areaal intergetijdengebied (ca 900 ha slik) die op een termijn van 30 jaar grotendeels behouden blijft. Zoals eerder opgemerkt (Hoofdstuk 6) wordt de mate waarin deze winst in de toekomst behouden kan worden waarschijnlijk overschat doordat slibprocessen en opslibbing van de intergetijdengebieden in deze studie niet zijn meegenomen. Ook de gehanteerde definitie van het areaal intergetijdengebied heeft een duidelijke invloed op de grootte van de bepaalde areaalveranderingen (vergelijk Figuur 8-4 en Figuur 8-5).
  4. De kleine afname van het areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde als geheel, zoals voorspeld in het nulalternatief, neemt in het pakket met een factor twee toe. De voorspelde absolute veranderingen in het areaal ondiepwatergebied zijn echter klein en de onzekerheden in de voorspellingen zijn groot. Dit is inherent aan de beperkte systeemkennis over plaatgeul-interacties en de modellering daarvan.

Het combineren van de maatregel uitpolderen met een verdieping leidt tot extra niet-lineaire morfologische effecten die klein zijn in vergelijking tot het nulalternatief en het effect van alleen een verdieping. Dit betekent dat het totale effect van het beschouwde pakket van maatregelen min of meer gelijk is aan de optelsom van de individuele maatregelen.

De antwoorden op de onderzoeksvragen impliceren dat de er geen aanwijzingen zijn dat de stabiliteit van het meergeulensysteem wordt aangetast als gevolg van het beschouwde pakket van maatregelen, mits de stortstrategie wordt verbeterd. De effecten betekenen dat het beschouwde pakket van maatregelen een relatief, grote en duurzame invloed heeft op de functie Natuur en dat de functie Toegankelijkheid wordt verbeterd.

---

## 9 Samenvatting en aanbevelingen

### 9.1 Samenvatting

#### Doel van het morfologisch onderzoek

Het voorliggende morfologische onderzoek is uitgevoerd in het kader van de strategische milieueffectenrapportage (S-M.E.R.). Het morfologische onderzoek richt zich op het toetsen van de randvoorwaarden waaronder het meergeulensysteem in het Schelde estuarium in stand kan worden gehouden bij toekomstige maatregelen en projecten die moeten bijdragen aan het Streefbeeld 2030, zoals dat in de lange termijn visie voor het Schelde estuarium is verwoord. De instandhouding van het meergeulensysteem is nodig om de Veiligheid, Toegankelijk en Natuurlijkheid in het estuarium in de toekomst te kunnen waarborgen. De evaluatie van de instandhoudingdoelstelling is vertaald naar de volgende vier onderzoeksvragen (zie Hoofdstuk 1):

1. Hoe ontwikkelt de zandhuishouding van het meergeulensysteem zich?
2. Hoe verandert de stabiliteit van het systeem van hoofd- en nevengeulen?
3. Op welke wijze verandert het intergetijdengebied, het areaal in het bijzonder?
4. Op welke wijze verandert het areaal ondiepwatergebied?

Drie verschillende projecten en maatregelen zijn in het morfologische onderzoek beschouwd:

1. Een voortzetting van het huidige en voorgenomen beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning, het zogenaamde referentie-/nulalternatief
2. Een verdere verruiming van de vaargeul waarbij drie toegankelijkheidsalternatieven zijn onderzocht: a) een getijonafhankelijke diepgang van 13.1m, b) een getijonafhankelijke diepgang van 12.8 m, en een getijonafhankelijke diepgang van 12.5 m.
3. Uitpolderingen langs de Westerschelde als maatregel voor natuurontwikkeling. Hierbij zijn twee voorbeeldmaatregelen onderzocht: a) een grootschalige uitpoldering van de Braakman en 2) een combinatie van meerdere kleinschalige uitpolderingen.

Bij al deze alternatieven dient de instandhouding van het meergeulensysteem gewaarborgd te zijn.

#### Globale aanpak

Onze huidige kennis is ontoereikend en onze onderzoeksmiddelen zijn onvoldoende ontwikkeld en gevalideerd om de morfologische ontwikkelingen van het Schelde-estuarium met grote mate van detail, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid te voorspellen. Daarom is gekozen voor een onderzoeksstrategie waarbij vooral is gekeken naar veranderingen en niet naar de absolute toestand. De morfologische effecten volgens het nulalternatief (Hoofdstuk 5) zijn beschouwd ten opzichte van de huidige en historische morfologische referentie (Hoofdstuk 4). De verdiepings- en de uitpolderingsalternatieven (Hoofdstukken 7 en 6) zijn vervolgens geëvalueerd t.o.v. het nulalternatief. Hierbij is nagegaan in hoeverre de waargenomen tendensen in de morfologische ontwikkelingen zich voortzetten, versterken of verzwakken of dat er nieuwe tendensen ontstaan. Hierbij is gebruik gemaakt van een aantal morfologische en hydrodynamische indicatoren.

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen zijn verschillende onderzoeksmiddelen, met elk hun eigen specifieke merites en beperkingen (Hoofdstuk 3) naast elkaar gebruikt.

---

---



---

## De historische referentie

De historische referentie laat zien dat het meergeulensysteem een morfologisch dynamisch systeem is dat op een tijdschaal van twee eeuwen een tendens van ontwikkelingen kent. Het geulsysteem is dieper geworden en het volume platen tussen de geulen (sediment) is toegenomen, het areaal ondiepwatergebied is afgenomen; het plaat-geul reliëf versteelt. Daarnaast is er sprake geweest van kantelingen van het geulsysteem, waarbij de ene geul duidelijk dieper/groter wordt dan de andere geul. Deze tendensen van kantelen van het geulsysteem op lange termijn (decennia-eeuw) zijn in beginsel vooral een natuurlijk proces geweest waarbij het vaargeulonderhoud deze ontwikkelingen in de loop der tijd is gaan versterken. Het is de vraag of dit geprononceerde kantelingproces zich in zeewaartse richting gaat uitbreiden, waardoor het karakter van meergeulensysteem verder verandert.

De ontwikkelingstendensen van het meergeulensysteem gedurende de afgelopen decennia, i.e. de antwoorden op de onderzoeksvragen 1 tot en met 4 kunnen, kunnen als volgt worden samengevat:

1. De zandhuishouding van het meergeulensysteem wordt sinds ongeveer 1970 gekenmerkt door een monotone erosie. Vooral het oostelijk deel verruimt, als gevolg van netto baggeren. Tot begin jaren negentig importeerde het systeem circa  $1 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  (vanaf de monding). Sinds 1990 exporteert het westelijk deel van het meergeulensysteem sediment naar zee. Een tweede kenmerkend aspect is het grote landwaarts gerichte sedimenttransport naar het oostelijk deel (zie Figuur 4-7).
2. De stabiliteit van het geulsysteem verandert in de loop der tijd als gevolg van natuurlijke processen en ingrepen. Vooral in het oostelijk deel en het middendeel (zie Figuur 2-1 en Figuur 4-8) zijn grote veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem opgetreden. De natuurlijke kanteling in het middengebied heeft sinds de tweede verdieping een forse nieuwe impuls gekregen door wijzigingen in de stortstrategie.
3. Het areaal platen neemt sinds 1975 enigszins af, waarbij grote ruimtelijke variaties optreden (zie Figuur 4-9). Hierbij zijn de platen gedefinieerd ten opzichte van vaste referentievlakken (zie Hoofdstuk 2).
4. Het areaal ondiepwatergebied neemt af (Figuur 4-10). Een deel van het ondiepwatergebied is veranderd in platen en een deel van de afname wordt veroorzaakt door een uitbreiding van het areaal geul dieper dan 5 meter.

Een degeneratie van het meergeulensysteem, waarbij het huidige twee-geulensysteem verandert in een een-geulsysteem, speelt zich waarschijnlijk af op een tijdschaal die beduidend groter is dan de tijdschaal van 30 jaar die in deze studie wordt beschouwd. Daarom zal voor de verschillende te onderzoeken alternatieven, naast en op basis van de antwoorden op de onderzoeksvragen 1 t/m 4, worden nagegaan of en hoe het huidige morfologische karakter van het meergeulensysteem (zie paragraaf 4.8) verandert.

## Het nulalternatief

In de berekeningen voor het nulalternatief wordt het huidige vaargeulonderhoud en de zandwinning (Tabel 5-1, Figuur 5-1) gedurende dertig jaar rigide voortgezet. In de praktijk komt het vasthouden van een stortstrategie gedurende 30 jaar eigenlijk nooit voor. Dit was nodig om de berekeningen te kunnen uitvoeren. De voorspelde morfologische veranderingen zijn vergeleken met ontwikkelingstendensen uit de historische referentie. De voorspelde morfologische ontwikkelingstendensen gedurende de periode 2001-2030 duiden grotendeels op een voortzetting van de historische ontwikkelingen gedurende de afgelopen decennia:

- 
1. De Westerschelde erodeert en exporteert sediment naar het mondingsgebied. Vooral het oostelijk deel van het meergeulensysteem erodeert als gevolg van netto baggeren. Het westelijk deel verondiept (verandering ontwikkelingstendens) als gevolg van netto storten (vraag 1, zandhuishouding).

- 
2. Een voortzetting en versterking van het kantelingproces in het midden en oostelijk deel en een verandering in de stabiliteit van het geulsysteem in macrocel 3 in het westelijk deel (nabij Terneuzen). Het geulsysteem bij Terneuzen kantelt fors onder invloed van netto storten in de vloedgeul. Hierbij lijkt sprake te zijn van een zichzelf versterkend proces (een instabiele situatie, vraag 2).
  3. Een voortgaande afname van het areaal intergetijdengebied in de Westerschelde, die zich vooral manifesteert in het oostelijk deel van de Westerschelde (vraag 3).
  4. Een verdere afname van het areaal ondiepwatergebied in het oostelijk deel en de Westerschelde als geheel doordat het geulsysteem in het oostelijk deel fors verruimt (vraag 4).

De veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem duiden op een verandering van het karakter van het geulsysteem onder invloed van natuurlijke processen en ingrepen. De eb- en vloedgeul in cel 3 worden minder gelijkwaardig van omvang en de aanwezigheid/activiteit van kortsluitgeulen vermindert. Dit suggereert een uitbreiding van het waargenomen geprononceerde kantelingproces in zeewaartse richting. De versterkte kanteling in het middendeel en oostelijk suggereren ook een verandering van het huidige karakter van het meergeulensysteem.

De onzekerheden in de voorspelde ontwikkelingen van de zandhuishouding zijn het kleinst. Deze worden gevolgd door de onzekerheden in de voorspelde veranderingen van de stabiliteit van het geulsysteem. De onzekerheden in de voorspelde stabiliteitveranderingen worden veroorzaakt doordat het model niet voldoende kon worden gekalibreerd (tijd en middelen) en doordat 1D-netwerkmodellen niet het gedrag van migrerende kortsluitgeulen kunnen simuleren. De onzekerheden in de voorspelde veranderingen van het areaal intergetijdengebied en het areaal ondiepwatergebied zijn relatief groot doordat onze huidige kennis over plaat-geul interacties nog onvoldoende is.

De historische referentie en de resultaten voor het nulalternatief hebben laten zien dat het meergeulensysteem wordt gekenmerkt door grote ontwikkelingen als gevolg van natuurlijke processen en ingrepen. In de navolgende alinea's worden de relatieve effecten van de uitpolderingsalternatieven en de verdiepingsalternatieven samengevat.

### **De uitpolderingsalternatieven**

De effecten van de twee bestudeerde uitpolderingsalternatieven kunnen als volgt worden samengevat:

1. De twee uitpolderingsvarianten veroorzaken op een termijn van 30 jaar kwalitatief vergelijkbare veranderingen in de zandhuishouding van het estuarium: een relatieve erosie zeewaarts van de uitpolderingen en een sedimentatie landwaarts van de uitpoldering. Deze veranderingen gaan gepaard met een geringe toename van de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel en een toename van de zeewaarts gerichte transporten (export) in het westelijk deel. Dit betekent in vergelijking tot het nulalternatief een verzwakking van de erosie en sedimentatietendensen en een versterking van de residuele sedimenttransporten.
2. De twee uitpolderingsvarianten veroorzaken kleine veranderingen in de erosie en sedimentatie van de geulen, die duiden op kleine veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem (vraag 2): de resultaten impliceren een afzwakking van de tendens van kantelen van het geulsysteem in het midden en oostelijk deel van de Westerschelde. De voorspelde relatieve sedimentatie (verminderde erosie) in de vaargeul betekent waarschijnlijk een kleine toename van het onderhoudsbaggerwerk.

- 
3. Op een tijdschaal van dertig jaar resulteert de aanleg van uitpolderingen een forse winst van het areaal intergetijdengebied, die op de schaal van de Westerschelde als geheel varieert tussen de 10 en 20%. De initiële winst gaat niet verloren tot 2030. Deze winst zou op een termijn van 50 tot 100 jaar wel kunnen afnemen als de getijslag landwaarts van de uitpoldering weer gaat toenemen en de geulen gaan eroderen. Het beeld van de veranderingen in het areaal intergetijdengebied is gevoelig voor de gehanteerde definitie en de onzekerheden rondom zeespiegelstijging (zie ook paragraaf 5.6.3).
  4. De tendensen in de ontwikkeling van het areaal ondiep watergebied veranderen niet wezenlijk als gevolg van de uitpolderingen. In het westelijk deel treedt een relatieve afname van het areaal op terwijl in het midden en westelijk deel een relatieve uitbreiding van het areaal optreedt. Deze veranderingen hangen samen met de voorspelde relatieve erosie (verminderde sedimentatie) van de geulen in het westelijk deel en de relatieve sedimentatie (verminderde erosie) in het midden en oostelijk deel.

Deze effecten betekenen dat de bestudeerde uitpolderingen een relatief grote en duurzame invloed hebben op de functie Natuur en een relatief kleine invloed hebben op de Veiligheid en Toegankelijkheid in het estuarium.

### **De verdiepingsalternatieven**

In deze studie zijn de morfologische effecten van twee verdiepingsalternatieven onderzocht:

1. Een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 13.1 meter, en
2. Een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 12.5 meter,

Voor alternatief 1 zijn meerdere varianten onderzocht om inzicht te krijgen in de invloed van de stortstrategie en de zandwinning. In paragraaf 8.4.2 wordt een samenvatting van de antwoorden op de onderzoeksvragen per alternatief gegeven. In deze samenvatting worden de belangrijkste effecten en conclusies alleen op hoofdlijnen samengevat.

Een verdieping naar 13.1 m, waarbij de aanlegspecie en de grotere baggervolumina voor het onderhoud van de vaargeul worden gestort volgens dezelfde stortstrategie als het nulalternatief, gaat overwegend gepaard met een versterking van de ontwikkelingstendensen volgens het nulalternatief. Dit betekent dat de potentiële knelpunten ten aanzien van de instandhouding van het karakter van het meergeulensysteem groter worden bij een verdere verdieping. Deze knelpunten kunnen voor een deel worden gemitigeerd door een aanpassing van de stortstrategie.

Een verdieping naar 13.1 m waarbij de stortstrategie wordt aangepast (verbeterde stortstrategie) leidt tot ('13.1-in-verbeterd' en '13.1-in-nulalternatief') een:

1. Veranderingen in de zandhuishouding waarbij de erosie van het oostelijk deel afneemt en de sedimentatie in het middendeel en het westelijk deel veranderen in een erosie. De sedimentexport naar de monding neemt af, terwijl de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel toenemen (zie Figuur 7-2).
2. De stabiliteit van het geulsysteem neemt toe, waarbij de zeewaartse uitbreiding van de kanteling van het meergeulensysteem niet optreedt (zie Figuur 7-8).
3. Een kleine toename van het areaal intergetijdengebied van het meergeulensysteem als geheel (vraag 3).
4. Een verdere afname van het areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde als geheel (vraag 4). Deze afname manifesteert zich in het westelijk deel en middendeel (relatief en absoluut, zie Figuur 7-13). In het oostelijk deel treedt een relatieve toename van het areaal ondiepwatergebied op (kleinere afname).

---

Het onttrekken van de specie die vrijkomt bij de aanleg van een verdieping, leidt er toe dat een klein deel van de mitigerende effecten van de verbeterde stortstrategie weer teniet worden gedaan: het areaal intergetijdengebied en het areaal ondiepwatergebied nemen iets af en de erosie van het meergeulensysteem als geheel neemt iets toe.

Het afbouwen van de zandwinning in de toekomst is een optie van het beleid. De effecten van het afbouwen zonder een wezenlijke verdere aanpassing van de verbeterde stortstrategie zijn groot voor wat betreft de zandhuishouding van het meergeulensysteem (minder erosie). Er treden grote veranderingen op in de stabiliteit van het geulsysteem die vergelijkbaar zijn met het nulalternatief. Het areaal intergetijdengebied neemt enigszins af terwijl het areaal ondiepwatergebied toeneemt toe. De voorspelde effecten geven aan dat een verdere verbetering van de stortstrategie nodig is om de stabiliteit van het geulsysteem te kunnen garanderen bij het afbouwen van de zandwinning.

De effecten van het 12,5 m verdiepingsalternatief met verbeterde stortstrategie kunnen worden bepaald door dit alternatief te vergelijken met het 13.1 m verdiepingsalternatief ('12.5-in-verbeterd' met '13.1m-in-verbeterd'). De effecten kunnen als volgt worden gekarakteriseerd:

1. Veranderingen in de zandhuishouding waarbij de erosie van het oostelijke deel afneemt (relatieve sedimentatie), de erosie van het middendeel toeneemt (absoluut en relatief) en de sedimentatie in het westelijk deel afneemt (relatieve erosie). De erosie van het meergeulensysteem als geheel verandert niet noemenswaardig. De sedimentexport naar de monding en de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel nemen af (zie Figuur 7-2).
2. De stabiliteit van het geulsysteem verandert weinig (niet significant gegeven de onzekerheden in de voorspellingen, zie Figuur 7-8).
3. Een kleine relatieve toename van het areaal intergetijdengebied in de Westerschelde als geheel (vraag 3), die zich manifesteert in het oostelijk deel. (zie Figuur 7-10).
4. Een kleine toename van het areaal ondiepwatergebied van het meergeulensysteem als geheel (vraag 4). Deze toename manifesteert zich in het oostelijk deel (zie Figuur 7-13).

Op basis van deze voorspelde effecten is de verwachting dat het 12.8 m verdiepingsalternatief kwalitatief vergelijkbare effecten zal veroorzaken als het 12.5 m verdiepingsalternatief. De grootte van de effecten zal wat kleiner zijn (tussen de effecten van 12.5 m en 13.1 m in).

Op basis van deze effecten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De huidige studie van de verdiepingsscenario's met een verbeterde stortstrategie tonen geen aantasting aan van de stabiliteit van het geulensysteem. Dat betekent dat de vaargeul waarschijnlijk kan worden verdiept onder voorwaarde dat er een verbeterde stortstrategie wordt toegepast. Bij een verdieping met verbeterde stortstrategie neemt de erosie van de Westerschelde als geheel af (vraag 1). De verandering van het areaal intergetijdengebied hangt van de mate van verdiepen (vraag 3). Het areaal ondiepwatergebied neemt af in alle verdiepingsvarianten (vraag 4).
- De verschillen tussen de effecten van de diverse verdiepingsalternatieven en varianten worden in belangrijke mate bepaald door de strategie voor het storten van de onderhoudsspecie (nulalternatief of verbeterd) en het al dan niet stoppen van de zandwinning. Het verschil in de effecten is het duidelijkst zichtbaar in de zandbalans en de stabiliteit van het geulsysteem. De voorspelde effecten op het areaal

---

intergetijdengebieden en het ondiepwatergebied zijn waarschijnlijk klein en relatief onzeker.

- Alle effecten zijn klein ten opzichte van de te verwachten toekomstige ontwikkelingen volgens het referentie-/nulalternatief.

### **Een combinatie van verdiepen en uitpolderen**

Tot slot is nagegaan wat de morfologische effecten zijn van het combineren van het Natuuralternatief Overige uitpolderingen en het Toegankelijkheidsalternatief verdiepen naar een diepgang van 13,1m met de voorlopig verbeterde stortstrategie. De effecten kunnen als volgt worden samengevat:

1. Het pakket van maatregelen gaat gepaard met veranderingen in de zandhuishouding die vergelijkbaar zijn met de veranderingen als gevolg van alleen het verdiepingsalternatief 13,1 m met verbeterde stortstrategie. Dit betekent in vergelijking tot het nulalternatief een meer evenwichtiger zandhuishouding waarbij de grootschalige erosie en sedimentatietendensen verzwakken en de zeewaarts gerichte transporten (export) in het westelijk deel van de Westerschelde afnemen en de landwaarts gerichte transporten naar het oostelijk deel juist toenemen. Het relatieve effect van de uitpoldering bestaat uit een relatieve erosie in het westelijk deel en een relatieve sedimentatie in het oostelijk deel die klein is in vergelijking tot het effect van het verdiepen en vooral de verbeterde stortstrategie.
2. De veranderingen in de stabiliteit van de geulen zijn eveneens vergelijkbaar met het verdiepingsalternatief. Dit betekent dat in vergelijking tot het nulalternatief de stabiliteit van de geulen toeneemt en het geulsysteem als geheel *minder* kantelt richting vaargeul. Deze verandering in de stabiliteit is vooral het gevolg van een aanpassing in de strategie voor het storten van de onderhoudsspecie. Aandachtspunt blijft wel het geulsysteem in macrocel 4 in het middendeel van de Westerschelde (nabij Hansweert). In alle alternatieven zoals die in deze studie zijn beschouwd treedt in dit geulsysteem volgens het SOBEK model (zie Figuur 7-8) een verdergaande kanteling richting vaargeul op, waarbij op een termijn van dertig jaar de ebgeul (nevenvaarwater) een nieuwe evenwichtssituatie bereikt. In deze nieuwe situatie is de ebgeul ongeveer 2 meter ondieper en de vloedgeul gemiddeld ongeveer 1 meter dieper dan in de huidige situatie.
3. De uitpolderingen resulteren in een forse initiële winst van het areaal intergetijdengebied (ca 900 ha slik) die op een termijn van 30 jaar grotendeels behouden blijft. Hierbij moet worden opgemerkt dat de mate waarin deze winst in de toekomst behouden worden waarschijnlijk wordt overschat doordat slibprocessen in deze studie niet zijn meegenomen. Ook de gehanteerde definitie van het areaal intergetijdengebied heeft een duidelijke invloed op de grootte van de bepaalde areaalveranderingen (vergelijk Figuur 8-4 en Figuur 8-5).
4. De kleine afname van het areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde als geheel, zoals voorspeld in het nulalternatief, neemt met een factor twee toe. De voorspelde absolute veranderingen in het areaal ondiepwatergebied zijn echter klein en de onzekerheden in de voorspellingen zijn groot. Dit is inherent aan onze beperkte systeemkennis over plaatgeul-interacties en de modellering daarvan.

Deze antwoorden op de onderzoeksvragen impliceren dat de er geen aanwijzingen zijn dat de stabiliteit van het meergeulensysteem wordt aangetast als gevolg van het beschouwde pakket van maatregelen. De effecten betekenen dat de beschouwde combinatie van

---

uitpolderingen een relatief, grote en duurzame invloed heeft op de functie Natuur en dat de functie Toegankelijkheid wordt verbeterd.

## **9.2 Aanbevelingen**

De resultaten van de huidige studie geven aanleiding tot verschillende aanbevelingen voor verder onderzoek. Hierbij kan een onderscheid worden gemaakt tussen aanbevelingen die zich richten op het vergroten van de systeemkennis en aanbevelingen die zich richten op het verbeteren en uitbreiden van het morfologische modelinstrumentarium. Deze aanbevelingen zijn van belang voor de uitvoering van project milieueffectenrapportages en langjarige onderzoeks- & monitoringsprogramma's.

### **Vergroten van de systeemkennis**

De waarnemingen geven aan dat de Westerschelde sinds 1990 sediment exporteert, terwijl er in de decennia daarvoor overwegend sedimentimport was. De oorzaak van deze omslag is niet goed bekend. De berekeningen voor het verdiepingsalternatief suggereren dat meer netto baggeren in het oostelijk en meer netto storten in het westelijk deel leiden tot een relatieve export van sediment in het westelijk deel van de Westerschelde. Dit betekent dat het verplaatsen van het zwaartepunt van de zandwinning van het westelijk deel naar oostelijk deel van de Westerschelde (in het begin van de jaren negentig) kan hebben geleid in de waargenomen omslag van sediment import naar sediment export. De tendens van export zou dan door de verandering van de stortstrategie sinds de tweede verdieping (meer storten in het westen) kunnen zijn versterkt. Verder kunnen de veranderingen in de stabiliteit van geulsysteem in het midden en westelijk deel eind jaren tachtig ook een rol hebben gespeeld in de omslag naar sedimentexport. Deze hypothesen over de veranderingen in de zandhuishouding zouden verder moeten worden onderbouwd voordat wijzigingen in het stortbeleid en het zandwinbeleid worden doorgevoerd.

---

Aanbevolen wordt om bij deze onderbouwing ook de relatie tussen de grootschalige veranderingen in de morfologie en de getijasymmetrie te beschouwen, omdat de getijasymmetrie een indicator is voor de netto sedimenttransporten in het estuarium en eenvoudig te monitoren is.

Uit de modelberekeningen is gebleken dat de voorspelde ontwikkeling van het areaal intergetijdengebied gevoelig is voor de gehanteerde definitie (vaste of variabele referentievlakken). Daarom wordt aanbevolen om naast de gebruikelijke historische analyses met vaste referentievlakken ook een analyse te maken van platen en slikken met een in de tijd en ruimte variërend hoogwater en laagwaterniveau. Hierbij zou in plaats van het aggregatieniveau oost, midden, west, moeten worden uitgegaan van een meer morfologisch georiënteerde gebiedsindeling.

Ons huidige inzicht in de historische veranderingen van het ondiepwatergebied is beperkt, terwijl deze gebieden toch van groot ecologisch belang zijn. Daarom wordt aanbevolen om een nadere analyse van de historische veranderingen van het ondiepwatergebied te maken om een meer inzicht te krijgen in locatie en oorzaken van de opgetreden veranderingen van het ondiepwatergebied. Hierbij zou bij voorkeur een morfologische indeling moeten worden gehanteerd (eventueel ook met variërend referentievlak).

De bagger- en stortstrategie voor het vaargeulonderhoud dient verder verbeterd en verfijnd te worden zodat:

- De zandhuishouding van het estuarium evenwichtiger wordt
- De stabiliteit van het geulsysteem gewaarborgd is
- Het onderhoudsbaggerwerk geminimaliseerd wordt (binnen de eerste twee randvoorwaarden).
- Zandwinning in de toekomst, indien gewenst, kan worden afgebouwd zonder dat dit leidt tot problemen in de stabiliteit van het meergeulensysteem.

Om deze verbetering te kunnen uitvoeren is een nadere analyse van historische bagger-, stort- en zandwingegevens nodig. Deze analyse moet zich minimaal richten op de relatie tussen de omvang van het onderhoudsbaggerwerk (per locatie) en: i) de gehanteerde stortstrategie, ii) lokale morfologische veranderingen (kortsluitgeulen, plaat-geul interacties) en iii) globale morfologische veranderingen die tot uitdrukking komen in de zandhuishouding (aanpassingen van evenwichtsdiepten door grootschalige erosie). Hierbij moeten gevalideerde morfologische modellen als hulpmiddel worden gebruikt.

Verder is het verstandig om een morfologische analyse uit te voeren van de Beneden Zeeschelde (van de grens tot aan Schelle). Door in deze analyse rekening te houden met schematisaties in bestaande 1D-morfologische modellen, kunnen de resultaten vrij eenvoudig worden gebruikt voor het valideren van de verschillende modellen.

Ten slotte dient een kwantitatieve morfologische analyse te worden uitgevoerd van het mondingsgebied (zandbalansen, analyse van geulontwikkelingen). Hiervoor is het noodzakelijk om een database van historische ingreepgegevens in het mondingsgebied op te stellen, waarbij de bagger- en storthoeveelheden zijn uitgedrukt in in-situ kubieke meters. Deze morfologische analyses moeten inzicht geven in de opgetreden veranderingen in de zandhuishouding van het mondingsgebied (buffer voor sediment uit de Westerschelde?) en de stabiliteit van plaat - geulsysteem in de monding.

### **Verdere ontwikkeling van het morfologische modelinstrumentarium**



---

In deze S-M.E.R. is gebruik gemaakt van een aantal onderzoeksmiddelen, waaronder verschillende numerieke modellen, met ieder hun eigen toepassingsgebied.

Noodzakelijkerwijs is gebruik gemaakt van bestaande onderzoeksmiddelen. Hoewel state-of-the-art was er in deze S-M.E.R. geen gelegenheid om het SOBEK model en het DELFT3D model volledig te kalibreren en te verifiëren (validatie). Binnen het kader van het RWS-project ZEEKENNIS wordt momenteel een validatie studie voor een DELFT3D model van het Schelde-estuarium uitgevoerd. Uit deze studie zal blijken welke morfologische processen wel en niet kunnen worden gemodelleerd en wat de voorspelkracht van het model is.

---

Er wordt aanbevolen om een vergelijkbare kalibratie en validatiestudie uit te voeren voor het SOBEK model, inclusief een onderzoek naar bandbreedten, zodat bij vervolgtoeepassingen de voorspelkracht en de onzekerheden van het model beter bekend zijn.

Het ESTMORF model was bij aanvang van de S-M.E.R. het enige operationele morfologische model. Voor de verdere ontwikkeling van dit model worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. Het verbeteren van de weergave van de intergetijdengebieden, zoals voorgesteld in Wang en Van Helvert (2001).
2. Nagaan of de weergave van de stabiliteit van de geulen verbeterd kan worden (zie ook Hoofdstuk 3).
3. Het uitbreiden van het modeldomein door een morfologische validatie uit te voeren voor de Zeeschelde, nadat een analyse van de historische ontwikkelingen in de Zeeschelde is uitgevoerd.
4. Ondiepwatergebieden worden niet expliciet gemodelleerd in het ESTMORF model doordat dit gebied onderdeel is van de geulen. Door de berekende ESTMORF bodemveranderingen te vertalen naar een bodemrooster voor 2D en 3D modellen kunnen indicatieve veranderingen van het areaal ondiepwatergebied worden bepaald. Het verdient aanbeveling om op deze wijze na te gaan hoe goed de historische ontwikkelingen van het areaal ondiepwatergebied kunnen worden gereproduceerd.
5. Het opnieuw kalibreren van de morfologie van het mondingsgebied, nadat een inventarisatie is gemaakt van de historische ingreepgegevens (uitgedrukt in in-situ kubieke meters).
6. Het uitvoeren van een bandbreedte onderzoek
7. Verifiëren (valideren) van het model met nieuwe waarnemingen in de toekomst. Hierbij kan worden overwogen om een model met de bodem van bijvoorbeeld 1990 te maken en de gesimuleerde veranderingen (zonder aanpassing van de instellingen) te vergelijken met de waargenomen veranderingen sinds 1990.

Ten slotte dient opgemerkt te worden dat een goed gevalideerd modelinstrumentarium kan worden gebruikt om de systeemkennis verder te vergroten.

---

## 10 Referenties

- Boon, J.D., R.J. Byrne, (1981), On basis hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Marine Geology*, pp. 27-48.
- Bray, R.N., A.D. Bates, J.M. Land (1997), *Dredging. A handbook for engineers*. New York, John Wiley.
- Claessens J., Meyvis L. (1994), Overzicht van de getijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1981-1990. Antwerpen, Ministerie van de Vlaamse gemeenschap, Antwerpse Zeehavendienst.
- Gruijters S.H.L.L., J. Schokker, J.G. Veldkamp (2004), Kartering moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde estuarium, TNO-rapport 03-213-B1208.
- Fokkink, R.J., Z.B. Wang, M.H.I. Schropp (1995), On 1D morphodynamic network models, 6th IAHR conference in London.
- Friedrichs, C.T., D.R. Lynch, D.G. Aubrey (1992), Velocity asymmetries in frictionally dominated tidal embayments: longitudinal and lateral variability. In: Prandle, D. ed., *Dynamics and Exchanges in Estuaries and the coastal Zone*. AGU, Washington, DC, pp. 277-312.
- Jeuken, M.C.J.L. (2000), On the morphologic behavior of tidal channels in the Westerschelde estuary. Proefschrift, Universiteit Utrecht.
- Jeuken, M.C.J.L. (2001), Verificatie van het cellen-concept Westerschelde op basis van historische gegevens. Delft, WL | delft Hydraulics. Rapportnr. Z3078.
- Jeuken, M.C.J.L., I. Tónczos, P.M.C. Thoolen, M.A.G. van Helvert, M. Rozemeijer, Z.B. Wang (2002), Onderbouwing van het Cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer. Delft, WL | delft Hydraulics. Rapportnr. Z2838/Z3288.
- Jeuken M.C.J.L. (2002), Adviezen voor het maken van een gezamenlijke zandbalans van Westerschelde en monding, WL | delft Hydraulics. Rapportnr. Z3213.
- Jeuken, M.C.J.L., I.C. Tónczos, Z.B. Wang (2003a), Evaluatie van het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning sinds de tweede vaargeulverdieping op basis van veldwaarnemingen en het verbeterde Cellenconcept Westerschelde. Delft, WL | delft Hydraulics. Rapportnr. Z3467.
- Jeuken M.C.J.L., Z.B. Wang, D. Keiller, I. Townend, G.A. Liek (2003b), Morphological response of estuaries to nodal tide variation. *Proceedings of the International Conference on Estuaries and Coasts*, 9-11 Nov., 2003, Hangzhou, China, pp. 166-174.
- Jeuken, 2004, Deelovereenkomst 3 MER-fase Morfologie, 'Vooronderzoek naar het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk en het verbeteren van de stortstrategie in de Westerschelde'.
- Kemerink, J.S. (2004), Ontpolderen: wel of niet? Effect van ontpolderen op natuurontwikkeling in het Schelde-estuarium. Afstudeerproject TU Delft. WL|delft Hydraulics, Rapport nr Z3561.
- Kornman. B.A., A. Arends, D. Dunsbergen, (2000), Westerscheldemonnd 1970-2020, een morfologische blik op de toekomst. RIKZ/200.030.
- Kornman B.A., G.A. Liek, H.K. Schippers (2003), Baggeren en storten in de Westerschelde, een nieuwe kijk op het onderhoudsbaggerwerk. Werkdocument RIKZ/AB/2002.840x.
- Peters J.J., R.H. Meade, R. Parker, M.A. Stevens, Westerschelde – Port of Antwerp expert team baseline **draft** report.
- Peters J.J. (2001), Improving navigation conditions in the Westerscheldt and managing its estuarine environment; how to harmonize accessibility, safety and naturalness?'. Rijkswaterstaat (1998), Milieuaspectenstudie Baggerspeciëstort Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Middelburg.

- 
- RWS&MVG (2001), Langetermijnvisie Schelde Estuarium. RWS Directie Zeeland en het ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- Shi, Y.B., Z.B. Wang, Z.C. Han (2003), Long-term morphological modelling for Feiyun Estuary with Estmorf. Proceedings for the International Conference of Estuaries and Coasts, 9-11 Nov., 2003, Hangzhou, China, pp. 968-975.

- 
- Peters, B.G.T.M., G.A. Liek, J.W.M. Wijsman, M.W.M. Kuijper, G.Th. van Eck (2003), Monitoring van de effecten van de verruiming 48'/43', een verruimde blik op waargenomen ontwikkelingen. MOVE Evaluatierapport. Rapport RIKZ/2003.027; deel A: Samenvatting en deel B: Hoofdrapport. Rijksinstituut voor Kust en Zee/ RIKZ Middelburg 16 juni 2003.
- Torenga, E. (2001), Stabiliteit van twee-geulensysteem in estuaria. Afstudeerrapport, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Aardwetenschap.
- Uit den Bogaard (1955-1993), Resultaten zandbalans Westerschelde. Universiteit Utrecht.
- Van Veen, J. (1950), Eb- en vloodschaar systeem in de Nederlandse Getijdenwateren. Tijdschrift Koninklijk Aardrijkskundige Genootschap, pp. 303-325.
- Van den Berg, J.H., M.C.J.L. Jeuken, A.J.F. van der Spek (1996), Hydraulic processes affecting the morphology and evolution of Westerschelde estuary. In: Nordstorm, K.F. and Roman, C.T, eds., Estuarine shores: Evolution, Environments and Human Alteration London, John Wiley, pp 157-184.
- Van der Male, C. (1996), De morfologische veranderingen op de Zeeschelde 1961 – 1992. Werkdocument RIKZ/ABD 96.837.
- Van der Spek, A.J.F. (1994), Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Utrecht, Utrecht University (PhD Thesis).
- Van der Spek, A.J.F. (1997), Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basin in the Netherlands: simulation of paleo-tides in the Schelde estuary. Marine geology, pp. 71-90.
- Vroon, J., C. Storm, en J. Coossen (1997), Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rijkswaterstaat, rapport RIKZ-97.023.
- Spek, A.J.F. van der (1997), De geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling. Rapport NITG 97-284-B, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Haarlem, 46 pp.
- Vos, P.C., R.M. van Heeringen, (1997). Holocene geology and occupation history of the Province of Zeeland. In: M.M. Fischer (red.), Holocene evolution of Zeeland (SW Netherlands), Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, 59: 5-109.
- Wang, Z.B., Th. van der Kaaij (1994), Morphodynamic development of secondary channel systems along Rhine branches in The Netherlands. Rapportnr. Q1963, WL | delft Hydraulics.
- Wang Z.B., M.B. de Vries, R.J. Fokkink, A. Langerak (1995), Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models. Journal of Hydraulic research, Vol 33, No 6.
- Wang Z.B., P.M.C. Thoolen, R.J. Fokkink (1997), Studie naar de morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde. Ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal. Delft, WL | delft Hydraulics. Rapportnr Z2310.
- Wang, Z.B., M.A.G. van Helvert, (2000), Verbetering weergave intergetijdengebied in ESTMORF; Implementatie van diverse maatregelen. Delft, WL | delft Hydraulics. Rapportnr. Z3002.
- Wang, Z.B., M.A.G. van Helvert (2000). Verbetering weergave intergetijdengebied in ESTMORF. Implementatie van diverse maatregelen. Delft, WL|delft Hydraulics. Rapportnr Z3002.
- Wang, Z.B., M.A.G. van Helvert (2001), ESTMORF, A model for long-term morphological development of estuaries and tidal lagoons. Overall review of the development of the model. Delft, WL | delft Hydraulics. Rapportnr. Z3105.

- 
- Wang Z.B., J.C. Winterwerp, (2001), Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems. In Proceedings of 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Sept. 2001, Obihiro, Japan, pp. 515-524.
- Wang Z.B., M.C.J.L. Jeuken, H. Gerritsen, H.J. de Vriend, B.A. Kornman, (2002), Morphology and asymmetry of vertical tide in the Westerschelde Estuary, Continental Shelf Research, Volume/Issue 22/17, pp. 2599-2609.
- Wang, Z.B., P.M.C. Thoolen, I. Tanczos (2002), Onderbouwing van het Cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer. Toetsing van aannames met SOBEK berekeningen. WL | delft Hydraulics rapport Z3325, cofinanciering doelsubsidie Z3288 door RIKZ.
- Wang, Z.B. (2003). A validation and improvement of the cell-concept: the influence of a flood-ebb circulation on the dumping capacity. WL | delft Hydraulics. Rapportnr Z3288.
- Wang Z.B., M.C.J.L. Jeuken, B.A. Kornman (2003), A model for Predicting Dredging Requirements in the Westerschelde. Proceedings of the International Conference of Estuaries and Coasts, 9-11 Nov., 2003, Hangzhou, China, pp. 429-436.
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuijper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen, Z.B. Wang (2000), Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie (2 delen). Delft, WL | delft Hydraulics. Rapportnr. Z2878.
- Winterwerp, J.C., Z.B. Wang, M.J.F. Stive, A. Arends, C. Jeuken, C. Kuijper, P.M.C. Thoolen, (2001), A new morphological schematization of the Western Scheldt Estuary. The Netherlands. In Proceedings of 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Sept. 2001, Obihiro, Japan, pp. 525-533.
- Winterwerp, J.C., Z.B. Wang, J.A. van Pagee, F. Mostaert, Y. Meersschaut, T. de Mulder, J. Claessens (2002), Morphological changes in the Scheldt Estuary and its consequences on hydrodynamics. Keynote speech at ESCA meeting (Ecological structure and functions in the Scheldt Estuary), Antwerp, Belgium.
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken (2004), Morfologisch onderzoek in het kader van de S-M.E.R. en de ontwikkelingsschets SE 2010. Executive summary. Delft, WL|delft Hydraulics.

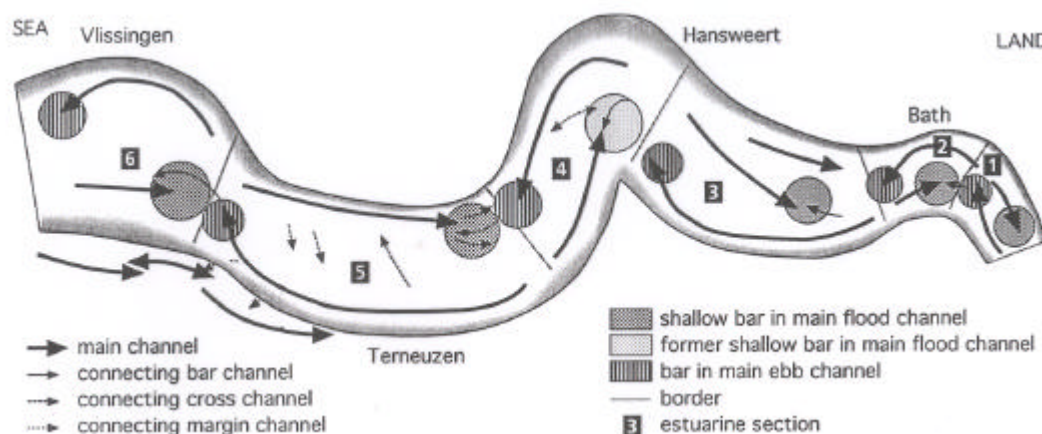
# Bijlage A – Het Cellenconcept

## Inleiding - wat is het Cellenconcept?

Het cellenconcept is een schematisatie en aggregatie van de morfologie en transportcapaciteit in het geulsysteem van de Westerschelde om de invloed van storten en baggeren op de stabiliteit van dat geulsysteem te kunnen bestuderen. Dit betekent dat het concept in essentie uit twee onderdelen bestaat: een schematisatie van het systeem van geulen en platen en een stabiliteitanalyse van het geschematiseerde geulsysteem. Beiden zullen in de volgende paragrafen kort worden toegelicht. Tot slot wordt een overzicht gegeven van de stortcapaciteit in de Westerschelde.

## Schematisatie van het geul-plaat systeem

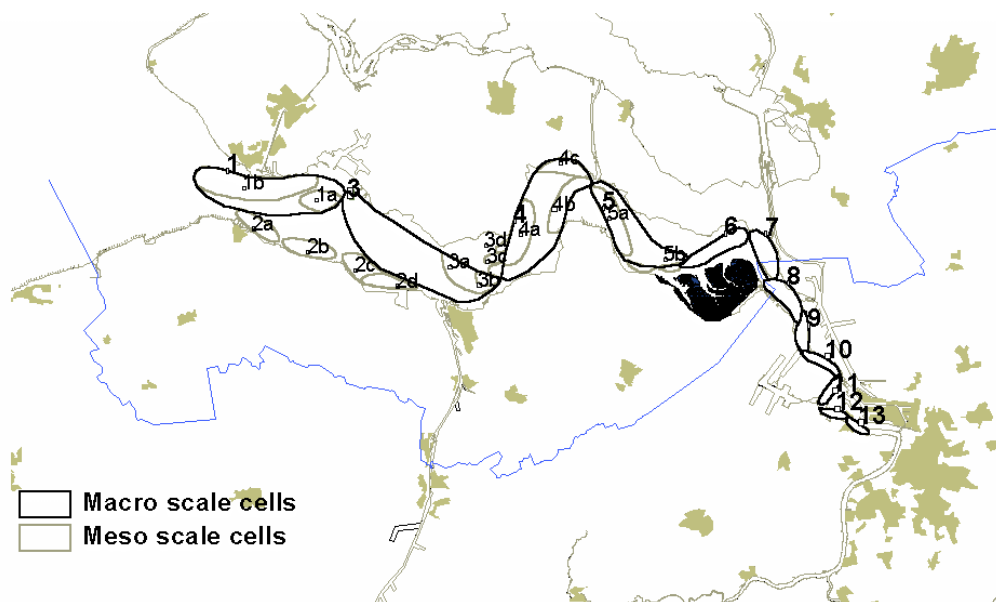
De Westerschelde wordt gekenmerkt door een mooi regelmatig patroon van geulen en platen. Morfologisch gezien kunnen deze geulen worden onderverdeeld in eb- en vloedgeulen. Het onderscheid tussen eb- en vloedgeulen is gebaseerd op de ligging van de drempel (ondiepte) in de geulen: vloedgeulen hebben landwaarts een drempel, ebgeulen hebben zeewaarts een drempel (Van Veen, 1950). Daarnaast kunnen de geulen, in deelgebieden van de Westerschelde, worden onderverdeeld in grote hoofdgeulen en kleinere kortsluitgeulen. Deze hoofdgeulen en kortsluitgeulen vormen samen een regelmatig repeterend patroon dat wordt aangeduid als estuariene sectie of bochtgroep (zie Figuur A. 1, Jeuken, 2000). Een estuariene sectie bestaat uit een grote gekromde ebgeul met daarnaast een rechte vloedgeul. Deze geulen worden meestal gescheiden door langgerekte plaatgebieden en met elkaar verbonden door de kleinere kortsluitgeulen. Iedere sectie wordt gekenmerkt door een eigen gedrag. Dit betekent dat de bochtgroep als een aparte morfologische eenheid kan worden beschouwd (Jeuken, 2000).



**Figuur A. 1** Morfologische schematisatie van het geulsysteem in de Westerschelde (Jeuken, 2000).

Op deze manieren van het schematiseren van het systeem van geulen en platen is in het kader van de LTV-studie voortgeborduurd (Winterwerp e.a., 2000). Het systeem van geulen is geschematiseerd als een ketting van morfologische cellen (Figuur A. 2) op basis van berekende getij-gemiddelde zandtransporten en het morfologische onderscheid tussen grote en kleine eb- en vloedgeulen. Iedere cel bestaat uit een ebgedomineerde (eb)geul,

een vloedgedomineerde (vloed)geul met daar tussen een plaat. De grote geulen (hoofdgeulen) vormen de macro-cellen. De meso-cellen zijn geassocieerd met de kleinere geulen of inscharingen. Een aantal van deze meso-cellen valt samen met de eerder genoemde kortsluitgeulen (cel 1, 3a-d, Figuur A. 2). Een belangrijke basis hypothese in dit cellenconcept is dat het systeem van macro en meso-cellen blijft bestaan zolang de individuele macro-cellen in stand blijven.



**Figuur A. 2 Macro- en mesocellen in de Westerschelde (Winterwerp e.a., 2000).**  
 Geulen in de macro-cellen: Cel 1= Honte, uitloop Wielingen en (Eb)Schaar van de Spijkerplaat, cel 3 = Everingen, Pas van Terneuzen, cel 4= Middelgat, Gat van Ossensisse, cel 5= Zuidergat / Overloop van Valkenisse, Schaar van Waarde/Valkenisse/Zimmermangeul, cel 6= Nauw van Bath, Schaar van de Noord, cel 7= Vaarwater boven Bath , Appelzak.

### Stabiliteitsanalyse

De stabiliteit van de morfologische cel vertoont veel overeenkomsten met een riviersplitsing, waarbij een geul zich splitst in twee kleinere geulen: tijdens eb is het landwaartse deel van de cel een splitsing en het zeewaartse deel een samenvloeiing. Tijdens vloed treedt de tegenovergestelde situatie op. De stabiliteit van dergelijke splitsingen wordt bepaald door de verdeling van het sedimenttransport als gevolg van lokale driedimensionale stroomverschijnselen. In 1D-modellen wordt de verdeling van het sediment transport en de stabiliteit van een splitsingspunt gemodelleerd door middel van een zogenaamde knooppuntrelatie. Veld- en laboratoriumonderzoek en analyses van 1D-netwerk modellen geven aan dat de volgende knooppuntrelatie het meest geschikt is voor het modelleren van dergelijke splitsingen (Wang e.a., 1995; Fokkink e.a., 1995):

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{1-k} \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^k$$

Hierin is  $k$  een dimensieloze coëfficiënt  $S_1$ ,  $S_2$  het sedimenttransport in de geulen 1 en 2,  $B_1$ ,  $B_2$  de breedte van de geulen en  $Q_1$  en  $Q_2$  de waterafvoer door de twee geulen.



---

In het verleden zijn verschillende studies uitgevoerd naar de stabiliteit van riviersplitsingen (zie bijv. Wang e.a., 1995, Wang en Van der Kaaij, 1994). Uit deze studies is gebleken dat de knooppuntrelatie een grote invloed heeft op de stabiliteit van een (rivier)splitsing. Voor grote waarden van  $k$  is de splitsing stabiel. Beide geulen blijven open. Voor kleine waarden is de splitsing instabiel: een van de geulen verzandt. Wanneer het sediment transport evenredig is met een macht  $n$  van de snelheid is de kritische grens voor  $k$  gelijk aan  $n/3$ . Voor de Engelund-Hansen transportformulering betekent dit dat de kritische  $k$ -waarde gelijk is aan  $5/3$ .

De analyses voor riviersplitsingen hebben betrekking op stationaire rivierstromingen. Om de conclusies voor riviersplitsingen te kunnen vertalen naar niet-stationaire getijsystemen wordt aangenomen dat de totale transportcapaciteit gedurende één getij vergelijkbaar is met de transportcapaciteit in het riviersysteem. Dit betekent dat het totale instantane sedimenttransport bepalend is voor de stabiliteit van het eb-vloedgeulstelsel en niet zozeer het residuele sedimenttransport. Op basis van deze aanname zijn in het kader van de Milieu Aspecten Studie (RWS, 1998) en de studie voor de LTV stabiliteitsanalyses uitgevoerd voor het geulstelsel in de Westerschelde die vergelijkbaar zijn met de theoretische analyses voor riviersplitsingen. Belangrijkst verschil is dat de invloed van baggeren en storten is meegenomen door het toevoegen van bron- en puttermen in de morfodynamische vergelijkingen (Wang e.a., 1997; Winterwerp e.a., 2000). Tijdens de LTV studie is tevens de interactie tussen geulen en platen op een vereenvoudigde manier gemodelleerd. Het doel van deze analyses was driedig:

- Nagaan of baggeren en storten de stabiliteit van een morfologische cel beïnvloedt.
- Als dat het geval is, nagaan bij welke omvang van baggeren en storten het geulstelsel van de cel instabiel wordt en tendeeft naar een één-geulstelsel.
- Nagaan in hoeverre de intergetijdengebieden de stabiliteit van het geulstelsel beïnvloeden.

De stabiliteit van een cel voor relatief kleine verstoringen wordt bepaald door het evenwicht tussen de verdeling van het sedimenttransport over de twee geulen en het transport door het geulstelsel als geheel. Een kleine verondieping (storting) in één van de geulen leidt lokaal tot het vernauwen van de geuldoorsnede en daarmee tot het vergroten van de lokale stroomsnelheid, waardoor de transportcapaciteit toeneemt, en de verondieping geërodeerd wordt. Dit is dus een stabiele situatie. Indien echter de verondieping een zekere grootte overschrijdt, neemt de hydraulische ruwheid van die geul snel toe, met als gevolg dat er minder water door de verondiepte geul, en meer water door de verdiepte geul stroomt. Het gevolg is dan een afnemende transportcapaciteit in de verondiepte geul. Dit is een zichzelf versterkend proces: de verondiepte geul wordt steeds ondieper en degenereert. Dit is dus een instabiele situatie. Een stabiliteitsanalyse kan dit proces kwantificeren (voor details zie Winterwerp e.a., 2000). Met behulp van deze analyse is onderzocht wanneer een verstoring, in de vorm van baggeren en/of storten, in de geulen uitdempt (stabiele situatie) of groeit (instabiele situatie). De groei van een verstoring wordt geïnterpreteerd als de aanzet tot een degeneratie van het geul-plaatsstelsel.

Uit de stabiliteitsanalyses zijn de volgende conclusies getrokken (Wang e.a., 1997, Winterwerp e.a., 2000; Wang en Winterwerp 2001; Torenga, 2001):

1. Een twee-geulstelsel kan zich ontwikkelen tot een beperkt aantal (meestal drie) evenwichtssituaties, namelijk één van de geulen dicht en de andere open (twee evenwichtssituaties, 1-geulstelsel) en beide geulen open (2-geulstelsel).

- 
2. Het netto storten van sediment beïnvloedt de stabiliteit van een twee-geulensysteem. Er is een kritische hoeveelheid voor te storten sediment waarboven het geulsysteem instabiel wordt. De kritische stortcapaciteit van een geul mag tijdelijk overschreden worden. Hoe lang dit precies is, is afhankelijk van de grootte van de geulen en de omvang van de ingrepen (zie Intermezzo Tijdschalen). Echter, een overschrijding over een te lange periode leidt *waarschijnlijk* tot een irreversibele degeneratie.
  3. De kritische stortcapaciteit bedraagt ongeveer 10% van de totale (bruto) transportcapaciteit (eb + vloedtransport) in het geulsysteem. De precieze waarde is afhankelijk van gebruikte parameters in het model, met name de k-waarde. Echter, de spreiding in het stortcriterium (ca. 5%) ten gevolge van realistische parameter variaties is klein ten opzichte van de onzekerheden in de bagger- en storthoeveelheden.
  4. Ook wanneer de storthoeveelheden beneden de kritische waarden liggen, beïnvloedt het storten de ontwikkeling van het twee-geulensysteem: ten eerste verandert het stabiele evenwicht met beide geulen open. Het één-geulsysteem, waar in de verzande geul gestort wordt, wordt stabiel in plaats van instabiel.

5. Het netto baggeren in één van de geulen heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem; het tussenliggende intergetijdengebied zal naar verwachting echter een paar cm per jaar eroderen via de plaat-geulinteractie. Echter, in combinatie met het storten in de andere geul heeft het baggeren een negatieve invloed op de stabiliteit van het geulsysteem: in het slechtste geval betekent dit een reductie van de stortcapaciteit van 10 naar 5%.
6. Wanneer in beide geulen netto evenveel gestort wordt bedraagt de maximale stortcapaciteit van het geulsysteem in de cel 20% (Torenga, 2001).

#### *Intermezzo - Tijdschalen*

De tijdschaal waarop het verondiepen van een geul ten gevolge van storten zichtbaar wordt kan worden afgeschat met

$$T_1 = \frac{BHL}{S}$$

B=de gemiddelde breedte van de geul waar gestort wordt, H=de gemiddelde diepte van de geul waar gestort, L= de lengte van de geul waar gestort wordt. BHL=geulvolume, S= de bruto transportcapaciteit van de cel (in m<sup>3</sup>/jr).

Getallen voorbeeld: Stel B=2000, H=7m, L=6000m, S=15\*10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/jr dan wordt het kantelen zichtbaar op een tijdschaal van ongeveer 5 jaar. Een schatting van T<sub>1</sub> voor de zes cellen in de Westerschelde is als volgt:

De tijdsduur van de totale degeneratie van een verondiepende geul ligt tussen de T<sub>2</sub> en T<sub>3</sub>:

$$T_2 = \frac{BHL}{I - I_{cr}}$$

$$T_3 = \frac{BHL}{I}$$

waarbij I= de stortomvang en I<sub>cr</sub> de kritische stortomvang waarbij een geul gaat verondiepen. Stel dat in het bovenstaande getallen voorbeeld I=2,7 \*10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/jr en I<sub>cr</sub>=0,9 \*10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/jr dan duurt het totale degeneratieproces, waarbij het twee-geulensysteem overgaat in een één-geulsysteem, 30 à 50 jaar (bij continu storten van 2.7Mm<sup>3</sup>/jr). Voorwaarde is dat het benodigde sediment beschikbaar is.

#### **Onderbouwing van het Cellenconcept**

De theoretische stortcapaciteit in de macrocellen is geverifieerd op basis van historische gegevens (Jeuken, 2001). Hieruit blijkt dat het theoretische stortcriterium redelijkerwijs kan worden toegepast op de *macro*-cellen. Dit betekent dat 5-10% van de totale bruto transportcapaciteit in een van de twee geulen van een macro-cel kan worden gestort zonder dat het geulsysteem gaat kantelen als gevolg van het storten en baggeren. Het precieze percentage is afhankelijk van de hoeveelheden en wijze waarop er gebaggerd en gestort wordt, en waarschijnlijk van de autonome ontwikkeling.

In het kader van het RWS-doelsubsidie project Inzicht in Watersystemen Westerschelde (IWW, Z3288) wordt door WL | delft Hydraulics de komende paar jaren gewerkt aan: i) het

---

onderbouwen, ii) operationaliseren, en iii) toepassen van het 'Cellenconcept Westerschelde' als instrument voor het ontwikkelen en evalueren van nieuwe, geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning in de Westerschelde.

In 2002 is het Cellenconcept onderbouwd. Hierbij heeft de nadruk gelegen op het verifiëren van de meest cruciale aannames die ten grondslag liggen aan het concept, en het verbeteren van de theoretische basis van het Cellenconcept. Hiervoor is een 1D morfologisch netwerk model onder SOBEK opgezet. De getijbeweging en de bruto en residuele zandtransporten in het model zijn gevalideerd (Jeuken et al, 2002). Vervolgens zijn met behulp van dit model zes aannames geverifieerd (Wang et al, 2002). Uit de analyses blijkt dat niet alle aannames in het Cellenconcept juist zijn; de stortcapaciteit wordt wel beïnvloed door: i) de autonome ontwikkeling van het geulsysteem: het van nature eroderen en sedimenteren van individuele geulen en de daarmee samenhangende erosie/sedimentatie van een macrocel en de sedimentuitwisseling tussen de macrocellen, ii) de morfologie van de geulen en de verschillen daarin tussen de ebgeul en de vloedgeul, het zogenaamde eb-vloedgeul karakter, en iii) de exacte locatie waar gestort wordt.

Uit de resultaten van de modelberekeningen met betrekking tot de invloed van de autonome ontwikkelingen (i) is het volgende geconcludeerd:

1. In een, van nature, eroderende vloedgeul bleek de stortcapaciteit groter te zijn dan 10% van de totale bruto transportcapaciteit van de *macrocel*. Deze grotere stortcapaciteit kan twee oorzaken hebben:
  - De morfologische verandering van de geul. Als een geul van nature erodeert betekent dat, in vergelijking tot een morfologisch niet veranderende geul, grotere stroomsnelheden en bruto sedimenttransporten en dus een grotere *absolute* stortcapaciteit in de betreffende geul. Met betrekking tot deze conclusie kan nog de volgende aanvullende opmerking worden gemaakt: Als de erosie van de geul wordt veroorzaakt door baggeren, zullen de stroomsnelheden, de bruto transportcapaciteit en de *absolute* stortcapaciteit juist kleiner zijn dan in een morfologisch stabiele geul.
  - De verschillen in de morfologie tussen de ebgeul en de vloedgeul. De gemiddelde dwarsdoorsnede en diepte van de beschouwde vloedgeul zijn groter dan van de ebgeul. Hierdoor heeft de vloedgeul een grotere bruto transport capaciteit dan de ebgeul. Het cellenconcept houdt hier (nog) geen rekening mee en relateert de stortcapaciteit aan het bruto zandtransport door de gehele cel en niet aan de bruto transportcapaciteit in de individuele geulen.
2. In een van nature eroderende macrocel, die sediment exporteert naar aangrenzende cellen, is de *absolute* transport- en stortcapaciteit groter dan in een cel die morfologisch stabiel is (qua sedimentinhoud en gemiddelde diepte). Met betrekking tot deze conclusie kan nog de volgende aanvullende opmerking worden gemaakt: als de erosie van de macrocel wordt veroorzaakt door baggeren, zullen de stroomsnelheden, de bruto zandtransporten en de *absolute* stortcapaciteit juist kleiner zijn dan in een morfologisch stabiele macrocel. Wanneer de erosie leidt tot een toename van de gemiddelde diepte zullen, bij een gelijk blijvend getijvolume, de stroomsnelheden, de bruto zandtransporten en de *absolute* stortcapaciteit in de cel gedurende het erosieproces afnemen. In een macrocel waar sedimentatie plaats vindt treden de tegengestelde effecten op.

Na het verifiëren van aannames is vervolgens de theoretische basis van concept verbeterd. Hierbij is nagegaan hoe de morfologische verschillen tussen de eb en vloedgeul, en de daarmee samenhangende residuele circulaties van water en zand, van invloed zijn op het stortcriterium en hoe dit in het cellenconcept kan worden meegenomen (Wang, 2003). De

---

stortcapaciteit die volgt uit het cellenconcept is gerelateerd aan de bruto transportcapaciteit door het geulsysteem en niet aan het resttransport. De residuele circulatie veroorzaakt indirect een enigszins grotere stortcapaciteit, d.w.z. via een toename van het totale transport. Dit betekent dat het eb-vloedgeul karakter en de daarmee samenhangende residuele circulatie leiden tot een iets grotere transport- en stortcapaciteit in het geulsysteem. Deze theoretische bevinding wordt bevestigd door een numerieke stabiliteitsanalyse. Praktisch gezien heeft deze uitkomst geen invloed op de toepassing van het cellenconcept, zolang de totale transportcapaciteit inclusief het effect van het resttransport wordt bepaald.

---

Naar aanleiding van de studies uitgevoerde voor de onderbouwing van het cellen concept is aanbevolen het estuarium integraal als één geheel te beschouwen bij het evalueren van het effect van baggeren en storten, in plaats van de macrocellen ieder individueel te beschouwen. Aanbevolen is dit te realiseren door een morfodynamische 1D netwerk model voor het hele estuarium op te zetten. Daarmee wordt de invloeden van sedimentatie-erosie van de geulen en de sedimentuitwisseling tussen de verschillende macrocellen op het stortcriterium impliciet meegenomen. Het SOBEK model opgezet tijdens het vooronderzoek in de huidige studie is hiervoor bedoeld.

---

# Bijlage B - Het actualiseren van ESTMORF met de bodemligging 2001

## B.1. Inleiding

Voor PROSES SMER project is de initiële bathemetrie van het ESTMORF Westerschelde model aangepast. De oude bodem van het model is gebaseerd op de gegevens uit 1968. Dit is nu vervangen met de gegevens van 2001.

Door deze aanpassing moeten de coëfficiënten in de empirisatie relaties voor het morfologische evenwicht worden veranderd. Deze coëfficiënten zijn ruimtelijk variërend hoewel zij theoretisch gezien constant zouden zijn. Vooral door het feit dat er altijd fouten zijn in de gegevens en in de schematisatie van de dwarsprofielen. Aangezien dergelijke fouten nooit hetzelfde zijn voor twee verschillende jaren is een aanpassing van de coëfficiënten noodzakelijk.

## B.2. Uitgangspunt

Het ESTMORF-WS, met de 1968 bodem, is al gekalibreerd aan de hand van gegevens m.b.t. morfologie ontwikkelingen in de periode 1968-1998.

Het nu aangepaste model, met de 2001 bodem, kan nog niet worden gekalibreerd omdat er nog onvoldoende gegevens zijn. Het betreft een Langetermijn model, 3 jaar is daarvoor veel te kort.

Dit alles overwegend wordt als uitgangspunt voor de aanpassing van de coëfficiënt gehanteerd dat het nieuwe model aan het begin dezelfde trend van morfologische ontwikkelingen moet simuleren als het oude model aan het eind van de kalibratie periode. Voordelen hiervan zijn:

1. toch enigszins kalibratie
2. consistentie met eerdere studies

## B.3. Aanpak / uitwerking

Ere zijn in principe drie coëfficiënten in het model voor de empirische evenwichtrelaties.

- $C_a$ , evenredig coëfficiënt tussen het evenwichtsoppervlakte van het dwarsprofiel van de geul en het getijvolume.
- Twee evenredigheidscoëfficiënten tussen de evenwichtshoogtes van het lage en hoge intergetijde gebied en het getijverschil.

Van de drie coëfficiënten heeft  $C_a$  de grootste invloed op de gesimuleerde morfologische ontwikkeling. Dit is ook de reden waarom tijdens de kalibratie van het oude model alleen  $C_a$  is aangepast en de andere twee coëfficiënten niet. De invloeden van de andere twee zijn veel minder, en bovendien is de marge van de variatie van deze twee coëfficiënten klein. Daarom wordt hier alleen de aanpassing van  $C_a$  uitgewerkt.

In het model relateert  $C_a$  de evenwichtsoppervlakte aan het getijvolume als volgt:

---


$$A_e = \frac{1}{2} C_a V$$



---

Hierin:

$A_e$  = evenwicht waarde van de oppervlakte van dwarsprofielen van geulen

$V$  = getijvolume

De waarde van  $A_e$  beïnvloedt het gedrag van het model via de lokale evenwichtsconcentratie.

$$c_e = c_E \left( \frac{A_e}{A} \right)^n \quad (\text{B.1})$$

$c_e$  = lokale evenwichtsconcentratie

$c_E$  = Overall evenwichtsconcentratie

$A$  = oppervlakte van dwarsprofiel geul

$n$  = macht, constant

Uitgaand dat de nieuwe bodem in het model gebaseerd op de 2001 gegevens niet te veel verschilt t.o.v. de eindtoestand gesimuleerd door de kalibratie run van het oude model zal het nieuw model dezelfde trend van morfologische ontwikkeling vertonen als  $c_e$  in alle vakken hetzelfde is als aan het einde van de kalibratie run met het oude model. Daarom wordt  $C_a$  zodanig aangepast dat

$$c_e(t=0)_{\text{nieuw model}} = c_e(t=t_{\text{end oud model}})$$

Dit houdt dus in:

$$\left[ \frac{A_e}{A} \right]_{t=0, \text{nieuw model}} = \left[ \frac{A_e}{A} \right]_{t=t_{\text{end}}, \text{oud model}} \quad (\text{B.2})$$

Hieruit volgt:

$$\frac{A_{e,n}}{A_{e,o}} = \frac{A_n}{A_o} \quad (\text{B.3})$$

waarbij subscript  $n$  begin van het nieuwe model aangeeft, en subscript  $o$  eind van de kalibratie periode van het oude model. Substitutie van (B.1) in (B.3) levert

$$\frac{C_{a,n}}{C_{a,o}} \frac{V_n}{V_o} = \frac{A_n}{A_o} \quad (\text{B.4})$$

of

$$\frac{C_{a,n}}{C_{a,o}} = \frac{A_n}{A_o} \cdot \frac{V_o}{V_n} = \frac{A_n/V_n}{A_o/V_o} \quad (\text{B.5})$$

---

Hiermee is de nieuwe coëfficiënt  $C_{a,n}$  uitgedrukt in grootheden die uit de invoerfiles van het oude model en van het nieuwe model en uitvoerfiles van de stromingsberekeningen te bepalen zijn.

---

## Bijlage C – de vertaling van 1D ESTMORF resultaten naar een rooster van een 2Dh-model

ESTMORF levert veranderingen van het profiel. Om deze 1-dimensionale profielveranderingen te vertalen naar een 2-dimensionale DELFT3D-Flow bodemschematisatie wordt onderscheid gemaakt tussen punten boven en onder het laagwater niveau, i.e. de droogvallende platen en de geulen.

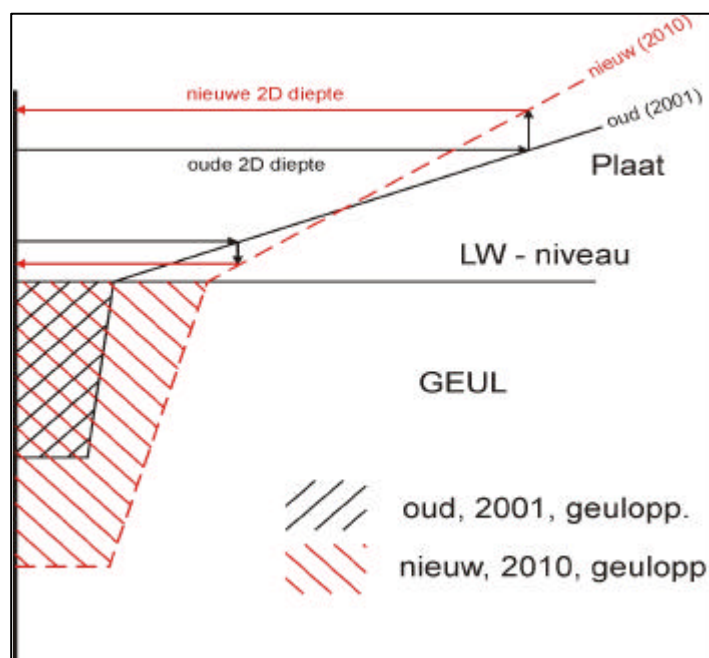
### *Diepteaanpassingen op de platen*

Voor het plaatgebied wordt de nieuwe 2D diepte bepaald zoals aangegeven in Figuur C. 1. Als eerste wordt de bij een 2D diepte behorende oude ESTMORF profielbreedte bepaald. Vervolgens wordt de nieuwe 2D diepte bepaald als het niveau in het nieuwe ESTMORF profiel met een identieke profielbreedte.

### *Diepteaanpassingen in de geulen*

Voor het geulgebied wordt als eerste de over het geulprofiel gemiddelde diepte verandering bepaald. Vervolgens worden twee diepteklassen onderscheiden:

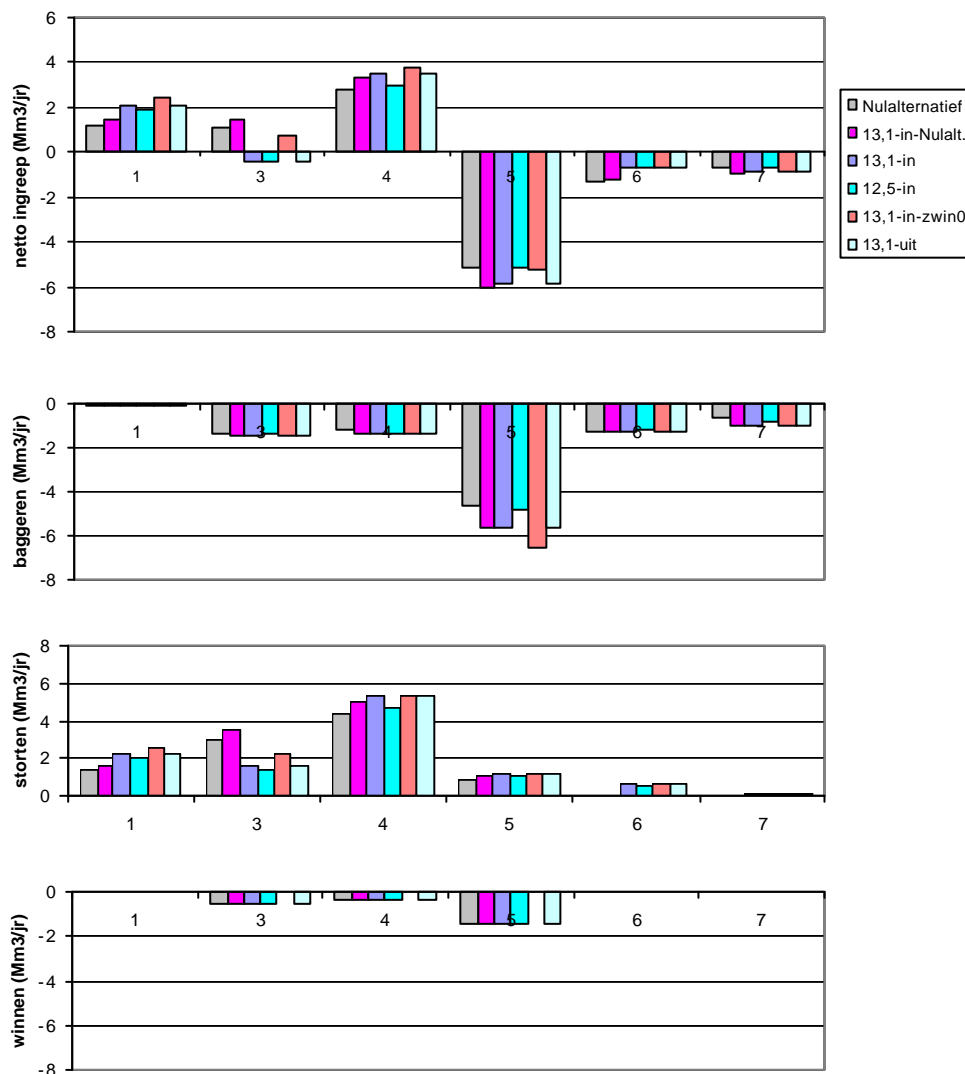
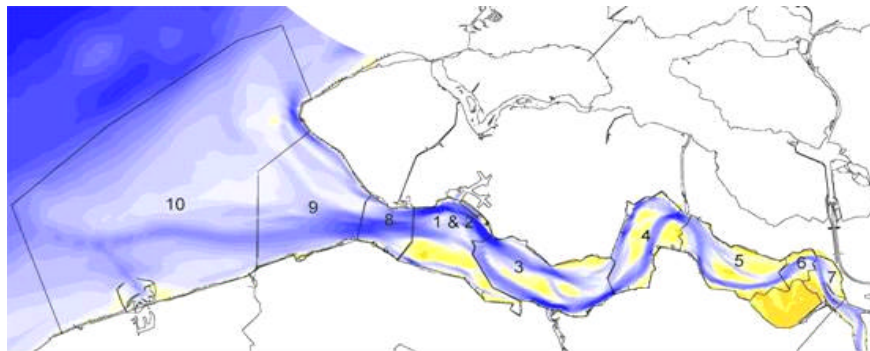
Een 2D-diepte beneden het laagwater niveau, maar boven de oude ESTMORF geul diepte, wordt verdiept met de gemiddelde ESTMORF diepteverandering, gewogen met de diepte beneden het laagwaterniveau. Een 2D-diepte gelijk aan het laagwaterniveau blijft onveranderd. Een 2D-diepte gelijk aan de oude ESTMORF geul diepte wordt verdiept met de gemiddelde diepteverandering. Een 2D-diepte groter dan de oude ESTMORF geuldiepte wordt verdiept met de gemiddelde ESTMORF diepteverandering.



---

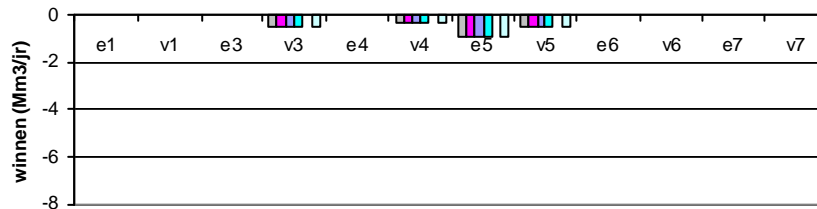
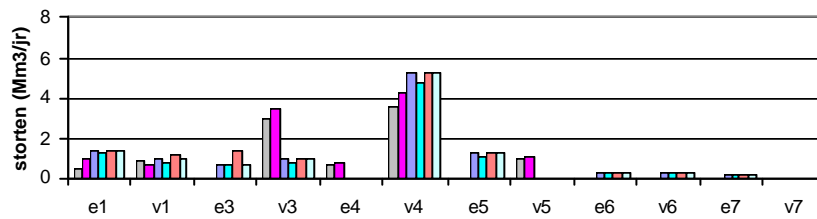
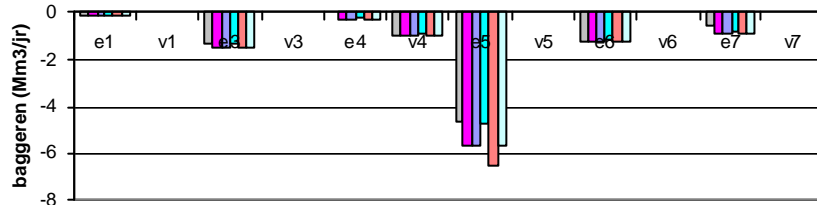
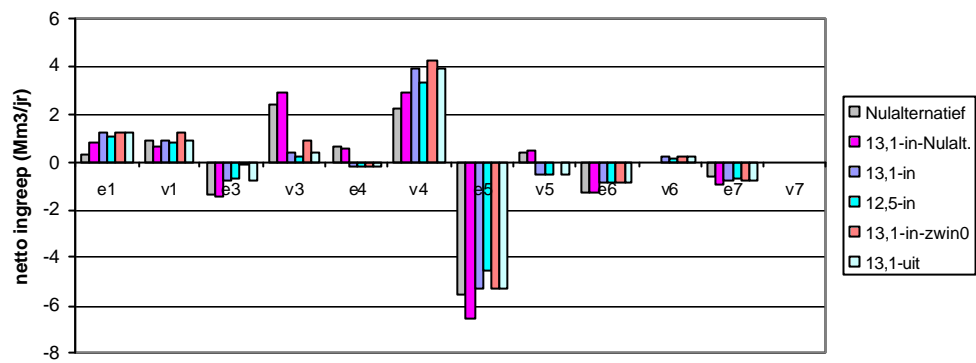
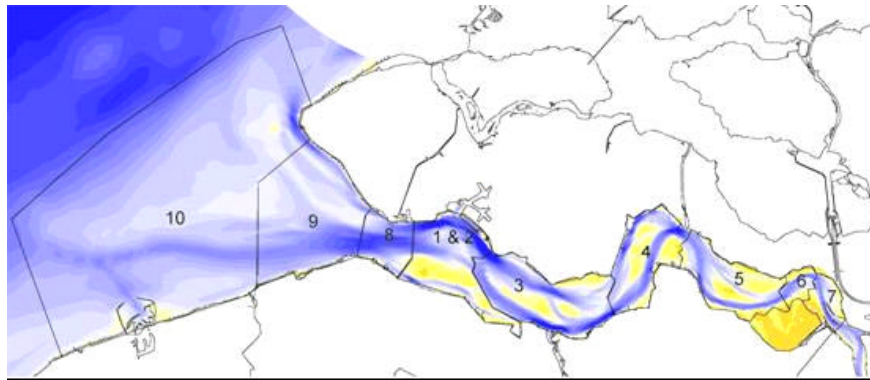
**Figuur C. 1**

## Bijlage D - Vaargeulonderhoud en zandwinning in het nulalternatief en de verdiepingalternatieven



---

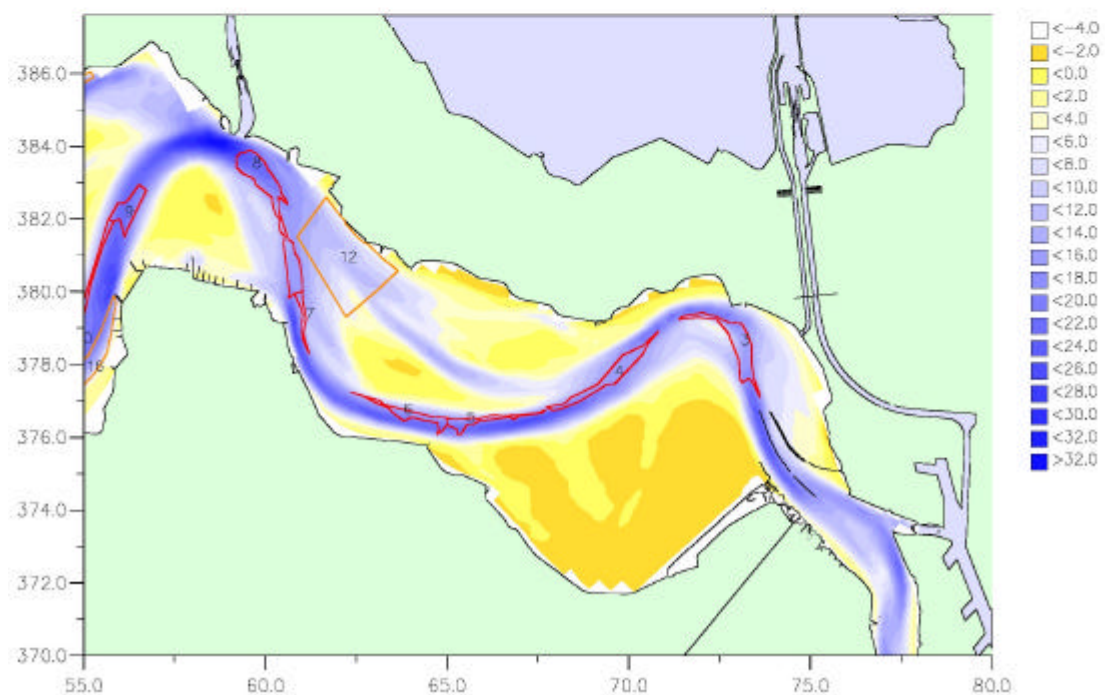
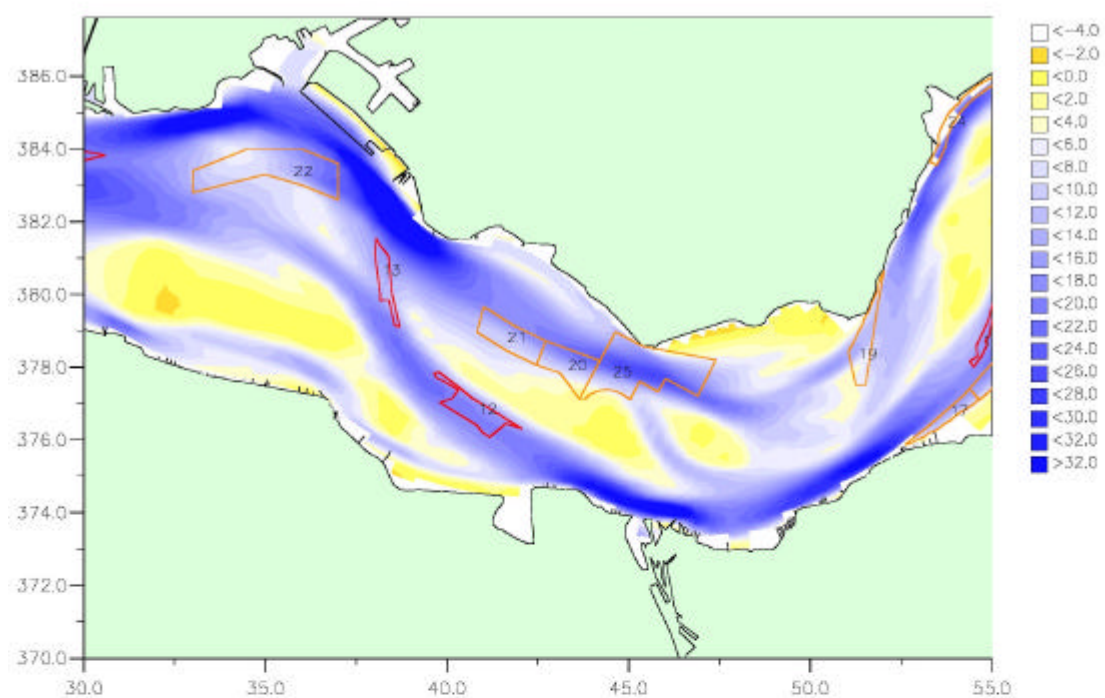
**Figuur D. 1 Ingrenen per zandbalansvak (aggregatieniveau van bochtgroepen/macro- en mesocellen) voor het nulalternatief en de verdiepingalternatieven. Netto ingrenen (bovenste figuur) zijn gedefinieerd als de som van de ingrenen baggeren, storten en zandwinning.**



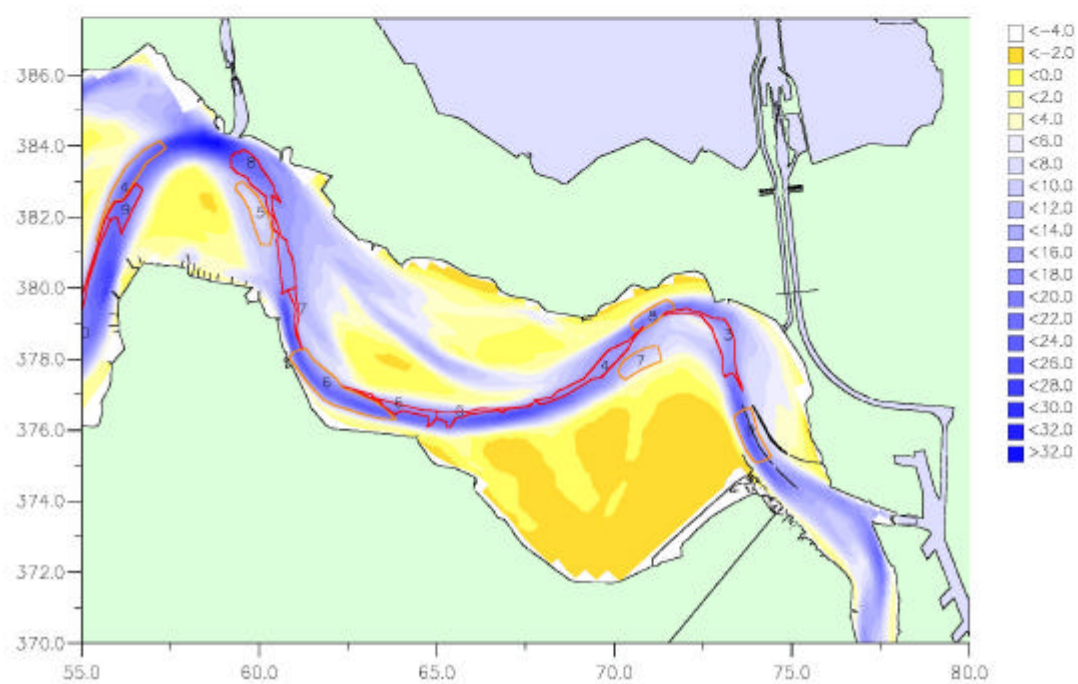
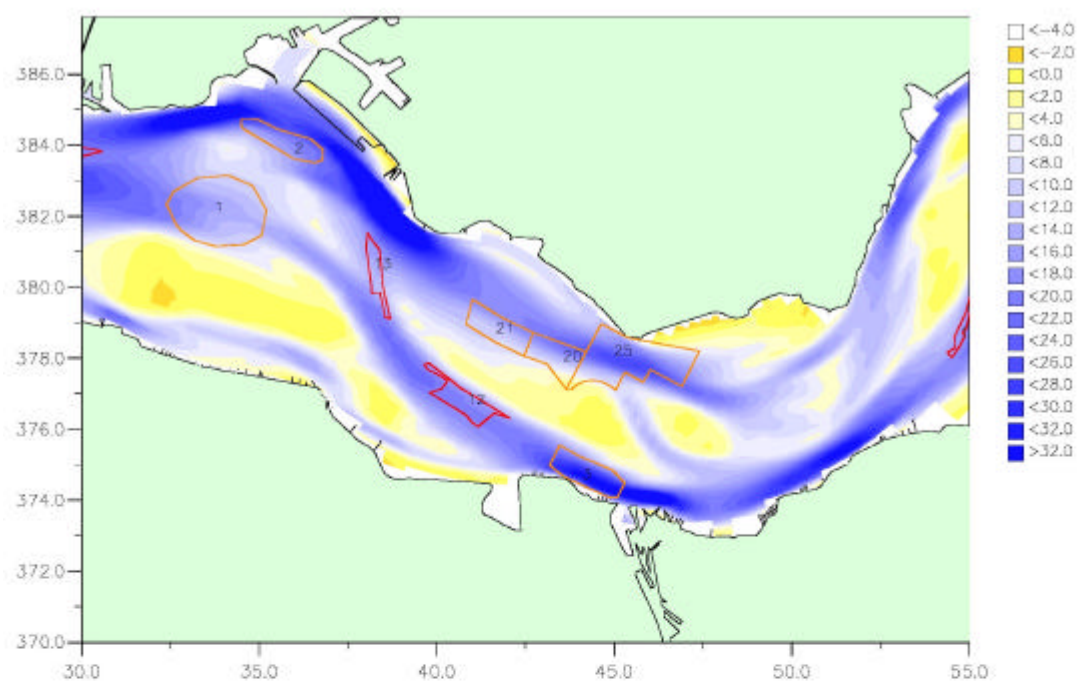
---

**Figuur D. 2 Ingrenen per eb en vloedgeul binnen de zandbalansvakken. e=ebgeul, v=vloedgeul. Netto ingrenen (bovenste figuur) zijn gedefinieerd als de som van de ingrenen baggeren, storten en zandwinning.**



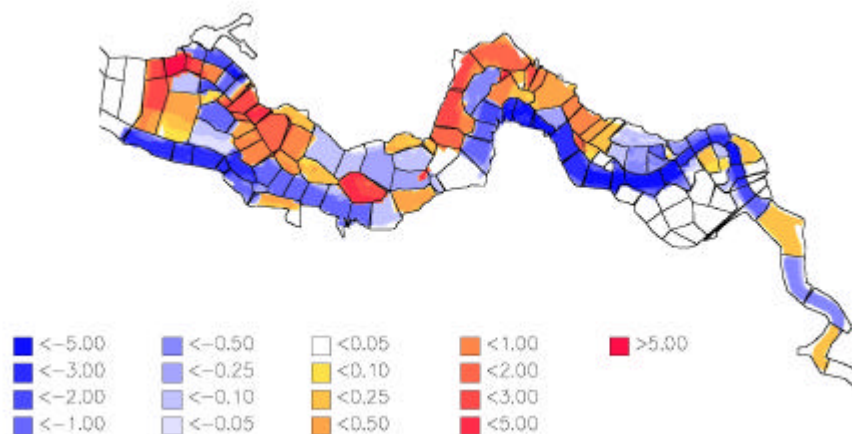


**Figuur D. 3 Bagger- stort- en zandwinlocaties in het nulalternatief.**

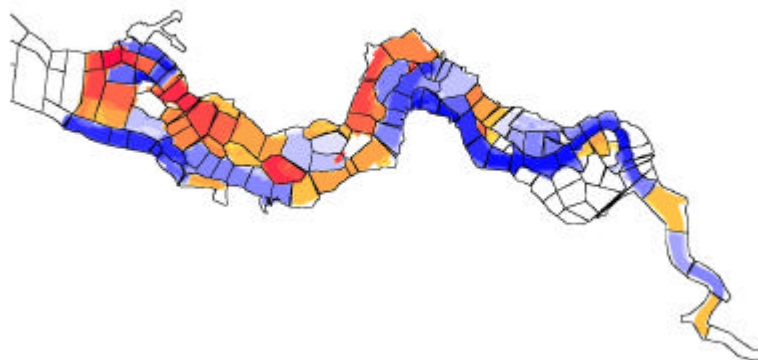


**Figuur D. 4 Bagger- stort en zandwinlocaties in de verbeterde stortstrategie**

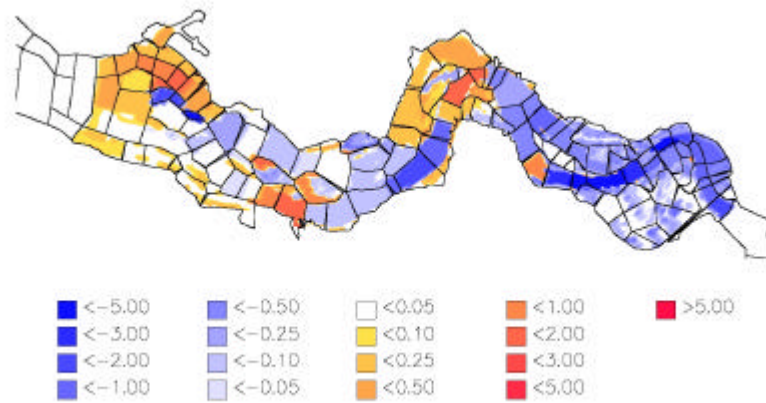
## Bijlage E - Erosie- en sedimentatiekaarten voor twee verdiepingsalternatieven



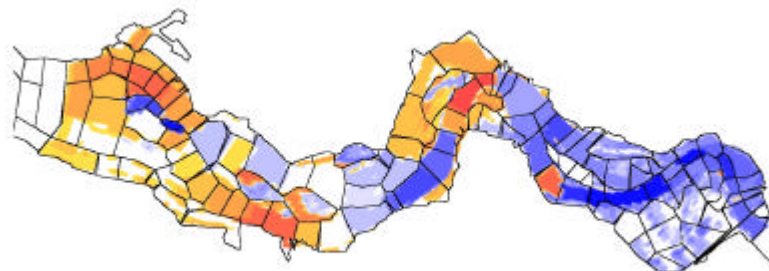
**Figuur E. 1:** Erosie en sedimentatie over de periode 2001-2030 volgens SOBEK voor het 12,5 m verdiepingalternatief waarbij de aanlegspecie en onderhoudspecie in het estuarium worden gestort volgens de verbeterde stortstrategie.



**Figuur E. 2:** Erosie en sedimentatie over de periode 2001-2030 volgens SOBEK voor het 13.1 m verdiepingalternatief waarbij de aanlegspecie en onderhoudspecie in het estuarium worden gestort volgens de verbeterde stortstrategie.

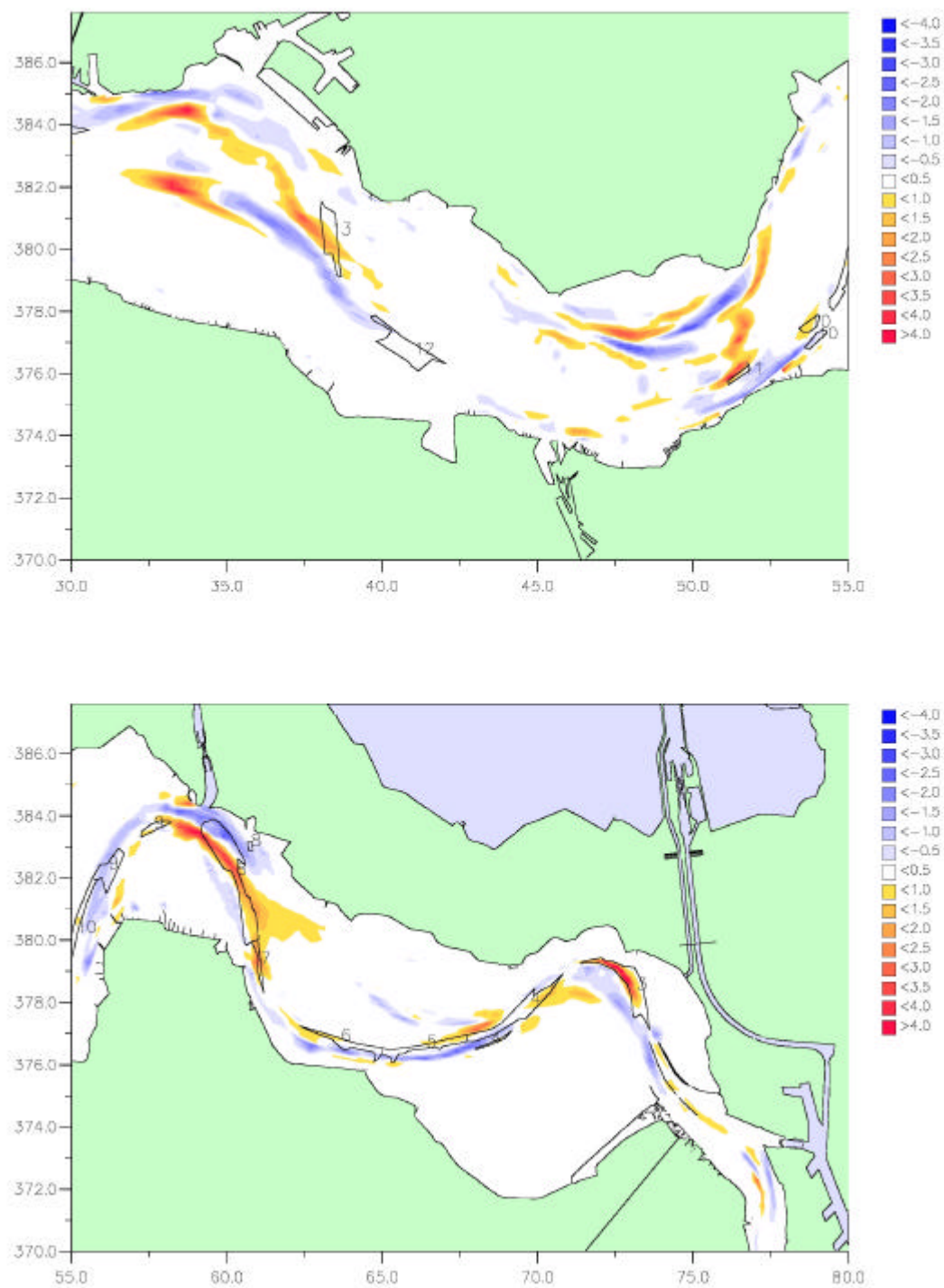


**Figuur E. 3: Erosie en sedimentatie over de periode 2001-2030 volgens ESTMORF voor het 12,5 m verdiepingalternatief waarbij de aanlegspecie en onderhoudsspecie in het estuarium worden gestort volgens de verbeterde stortstrategie.**



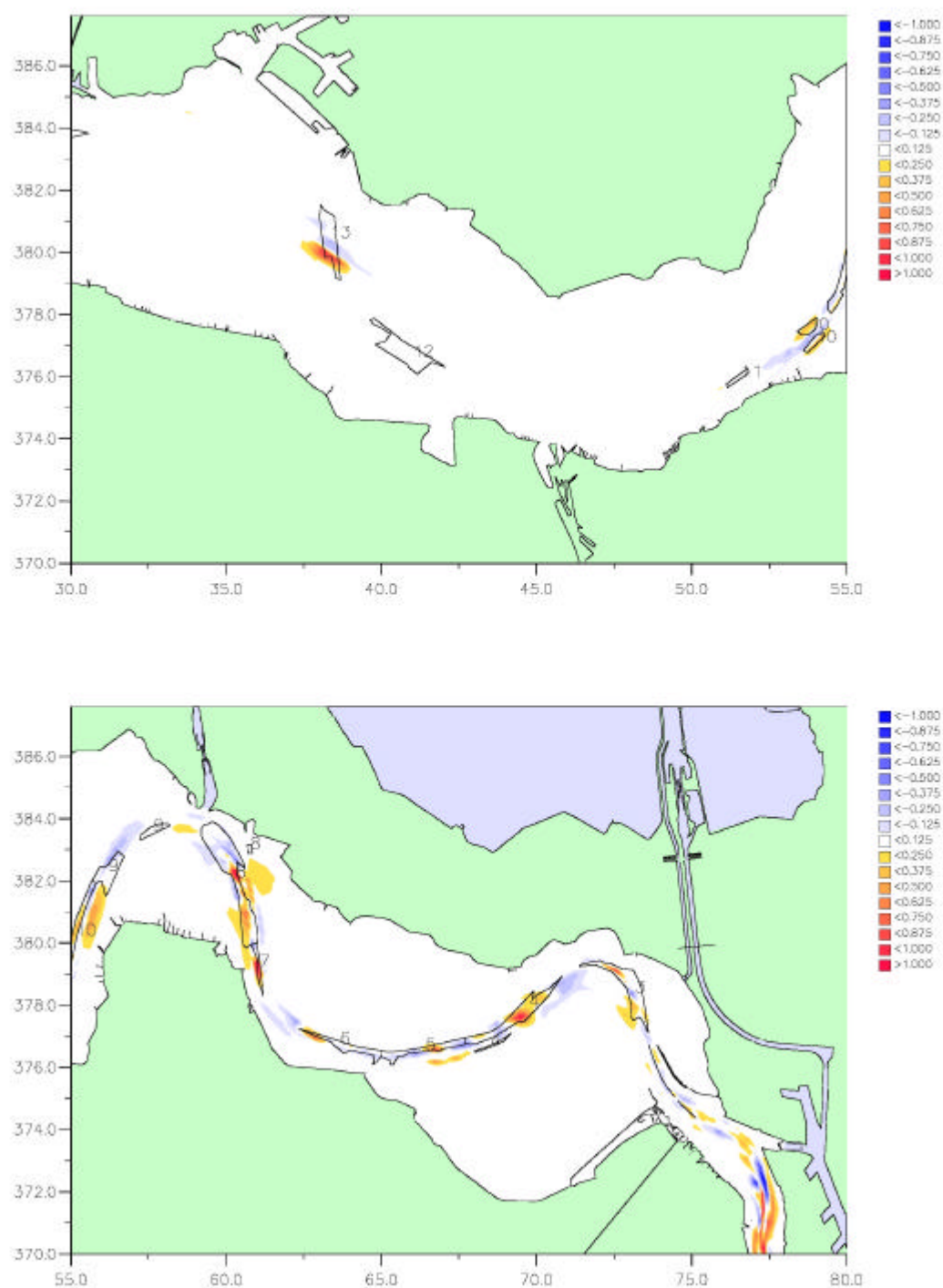
**Figuur E. 4: Erosie en sedimentatie over de periode 2001-2030 volgens ESTMORF voor het 13.1 m verdiepingalternatief waarbij de aanlegspecie en onderhoudsspecie in het estuarium worden gestort volgens de verbeterde stortstrategie.**

## Bijlage F - Resultaten van DELFT3D berekeningen

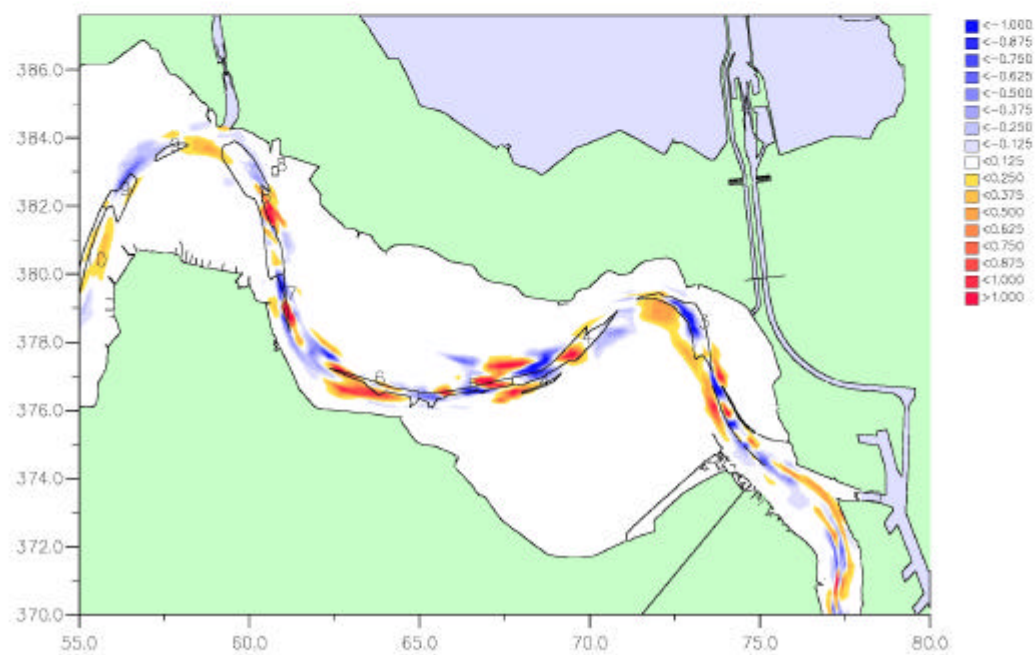
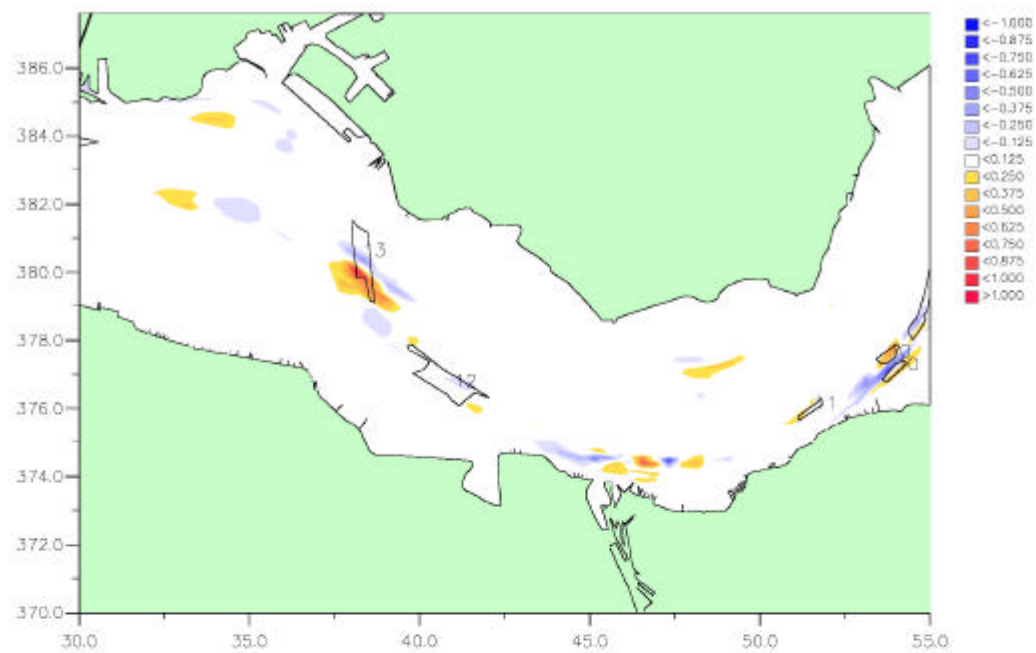


Figuur F. 1: Erosie en sedimentatie na 1 jaar (in m) voor het nulalternatief, run x-19.

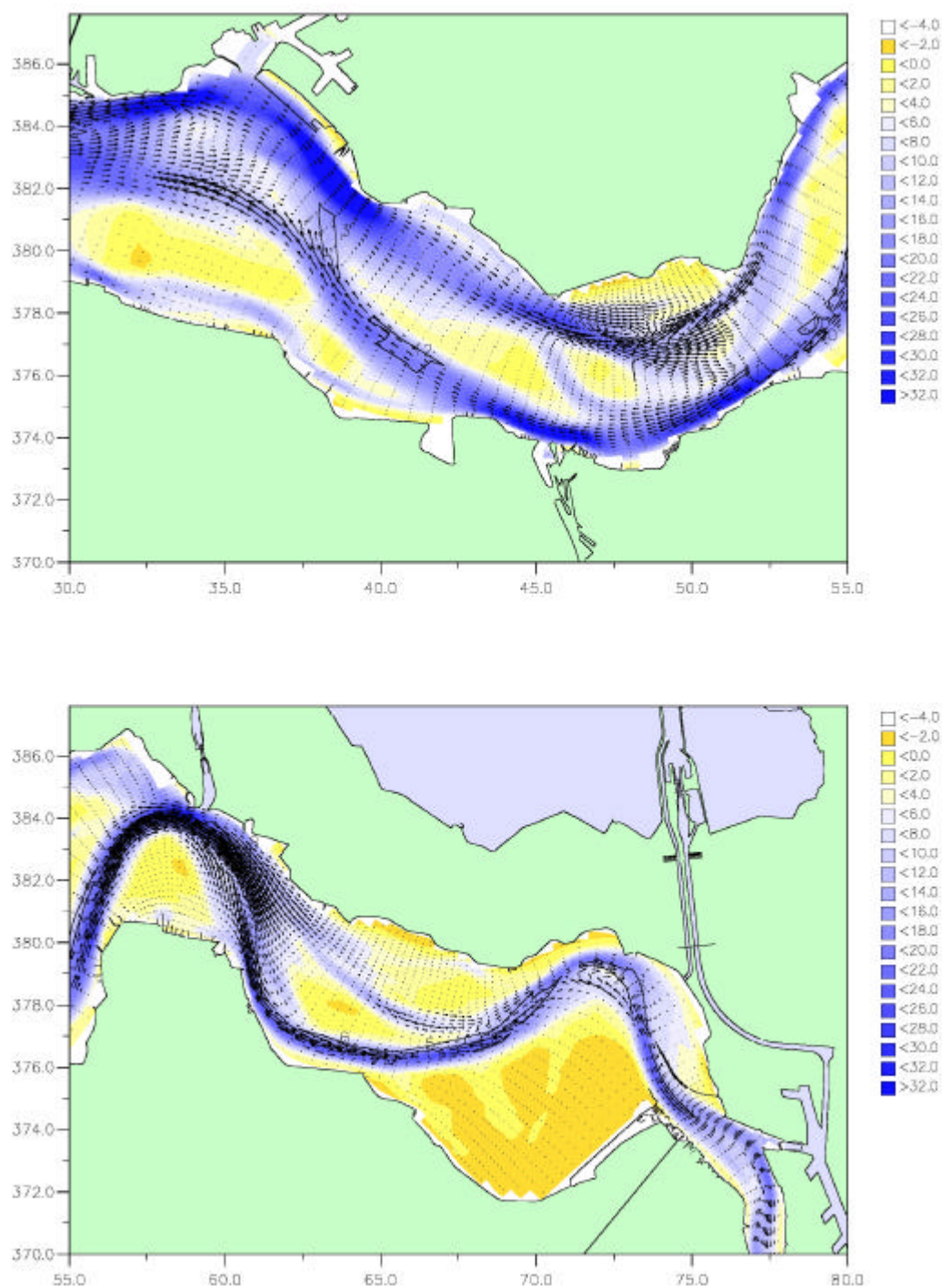




**Figuur F. 2: Relatieve erosie en sedimentatie in het verdiepingalternatief 12,5m ten opzichte van het nulalternatief (Run x18, verschil in bodemverandering t.o.v. nulalternatief).**

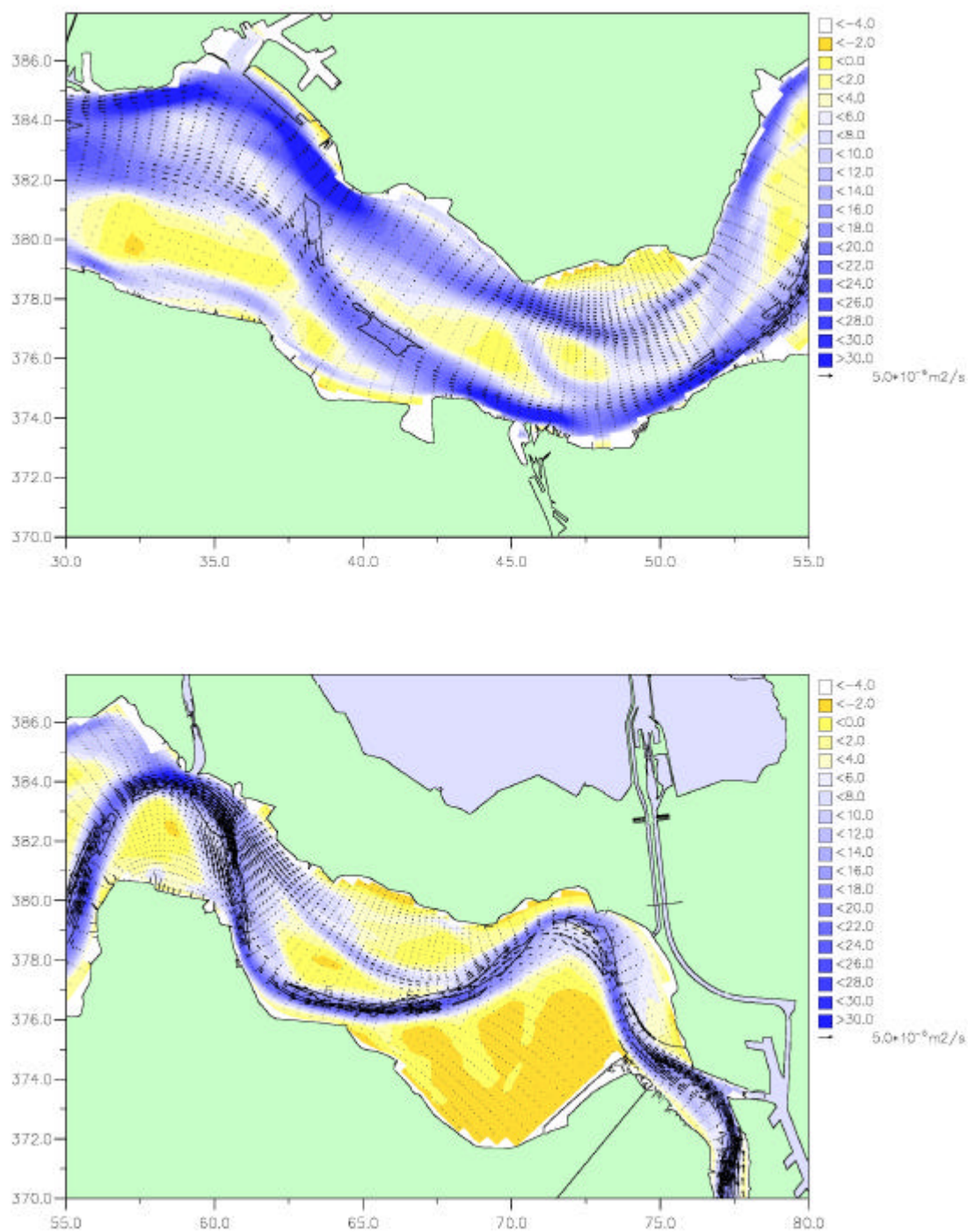


**Figuur F. 3: Relatieve erosie en sedimentatie in het verdiepingalternatief 13,1m ten op zichten van het nulalternatief (Run x16, verschil in bodemverandering t.o.v. nulalternatief).**

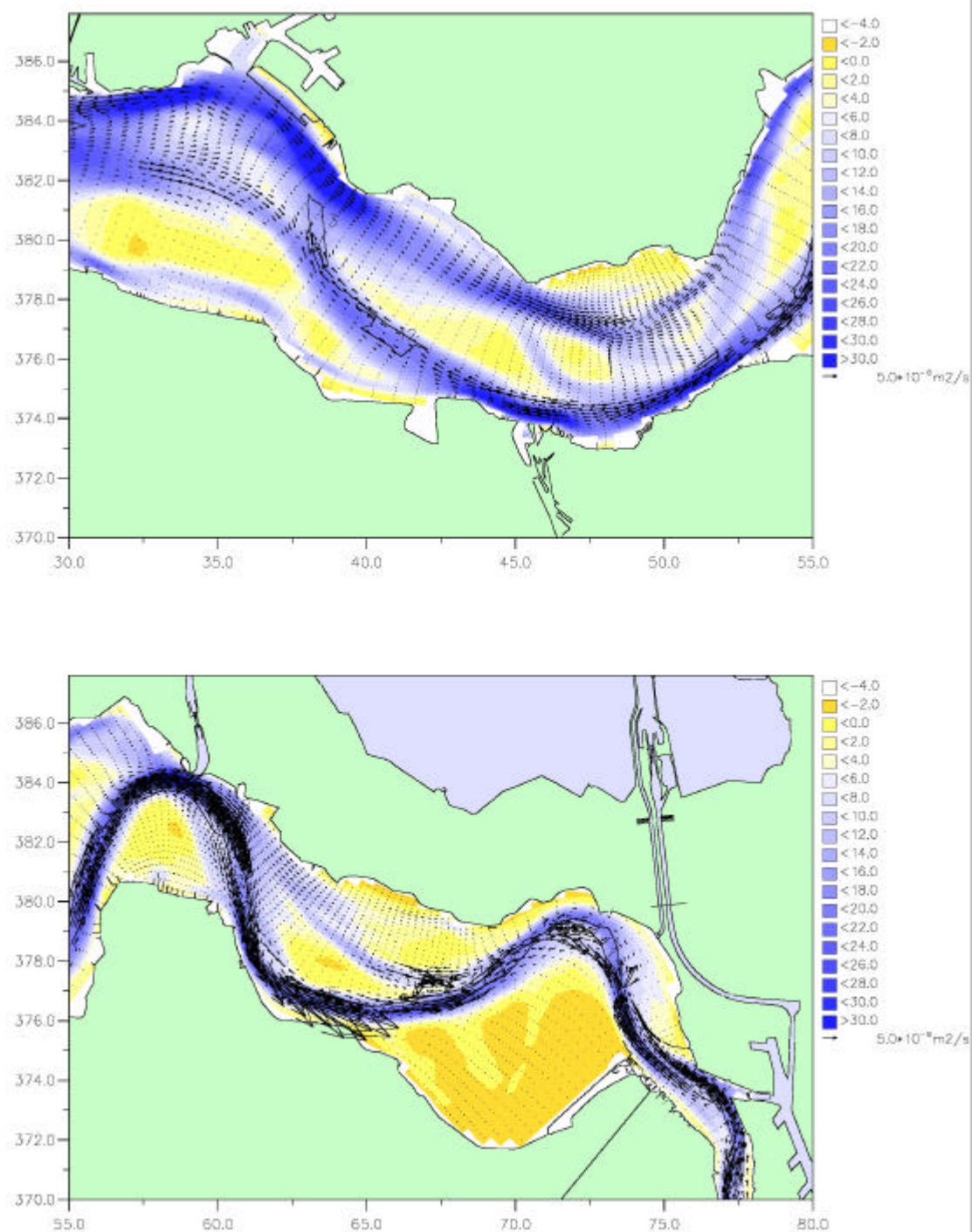


**Figuur F. 4: Patroon van resttransporten in het nulalternatief.**



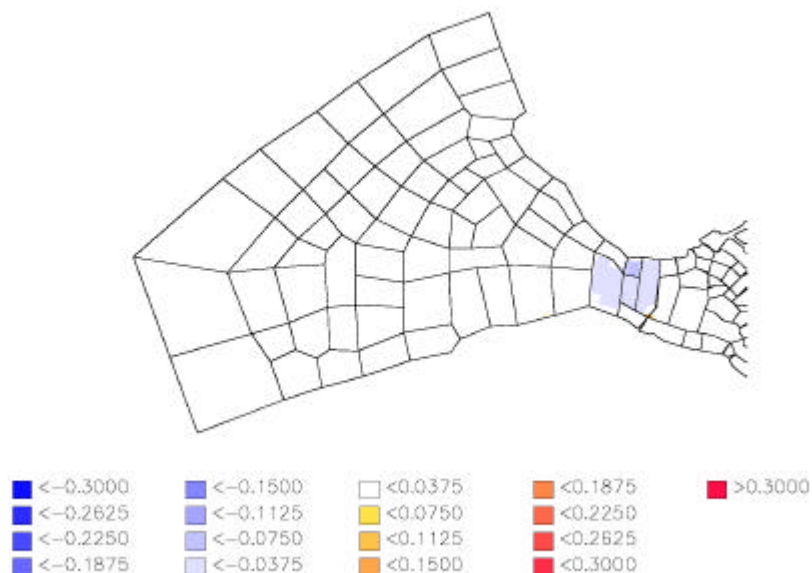


**Figuur F. 5: Relatieve resttransporten in het verdiepingalternatief 12,5m ten opzichte van het nulalternatief (Run x18, verschil in resttransporten t.o.v. het nulalternatief).**

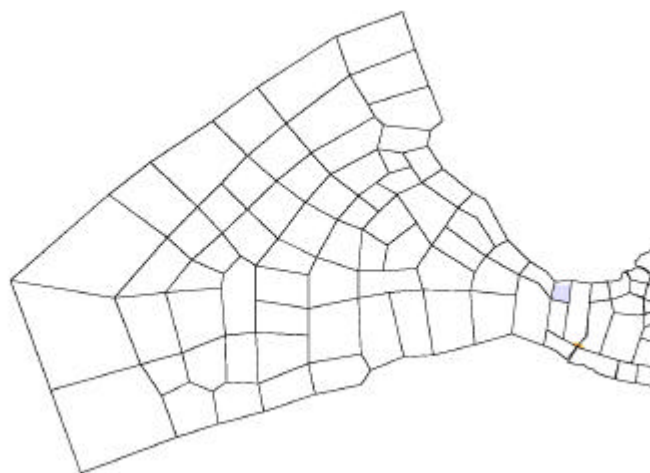


**Figuur F. 6: Relatieve resttransporten in het verdiepingalternatief 13,1m ten opzichte van het nulalternatief (Run x16, verschil in resttransporten t.o.v. het nulalternatief).**

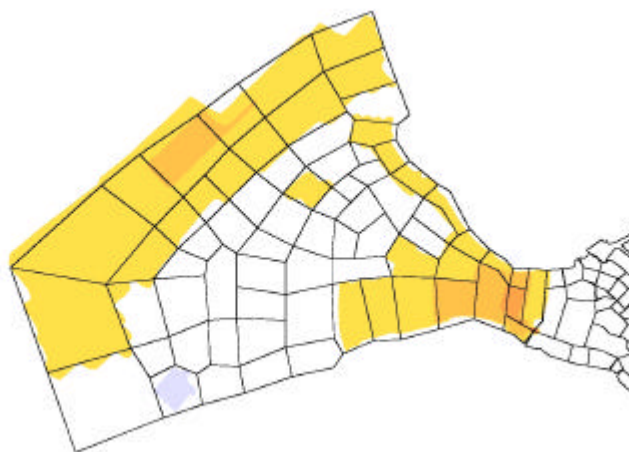
## Bijlage G - Relatieve erosie en sedimentatie in het mondingsgebied bij verschillende verdiepingsalternatieven



**Figuur G. 1: Relatieve erosie en sedimentatie in het mondingsgebied over de periode 2001-2030 volgens ESTMORF voor het 12,5 m verdiepingsalternatief met het storten van aanlegspecie en onderhoudsspecie in het estuarium volgens de verbeterde stortstrategie. Het verschil is bepaald ten opzichte van het nulalternatief.**



**Figuur G. 2: Relatieve erosie en sedimentatie in het mondingsgebied over de periode 2001-2030 volgens ESTMORF voor het 13,1 m verdiepingsalternatief met het storten van aanlegspecie en onderhoudsspecie in het estuarium volgens de verbeterde stortstrategie. Het verschil is bepaald ten opzichte van het nulalternatief.**



**Figuur G. 3: Relatieve erosie en sedimentatie in het mondingsgebied over de periode 2001-2030 volgens ESTMORF voor het 13,5 m verdiepingsalternatief met het storten van aanlegspecie en onderhoudsspecie in het estuarium volgens de verbeterde stortstrategie en geen zandwinning. Het verschil is bepaald ten opzichte van het nulalternatief.**